Scienza e musica

di JAMES JEANS

BOMPIANI

AVVENTURE DEL PENSIERO

UNA RACCOLTA DI VOLUMI IMPENSATI, CHE LASCIANO IL LETTORE ORA PENSOSO, ORA COMMOSSO, ORA SBALORDITO, TRASPORTANDOLO IN UN MONDO RARAMENTE ESPLORATO DAI LIBRI, QUASI UN'OASI LONTANA DALLE CURE E DAI PENSIERI ABITUALI

VOLUME XXXIII°

SCIENZA E MUSICA

DI JAMES JEANS

Appare oggi necessaria una conoscenza non troppo superficiale di certi fenomeni acustici che anche l'uomo della strada è avvezzo ormai a disciplinare a suo agio. Dell'udito e dei suoi misteri, di questo senso che, subito dopo la vista ha un compito essenziale nella vita umana, ben poco sino ad oggi hanno saputo anche le persone di discreta cultura. Si intuisce che il rivelatore d'un grammofono e l'altoparlante della radio siano congegni ammirevoli. Ma se ne ignora il perchè. È facile distinguere un suono da un rumore, ma ben diverso e più complesso intendere l'intima ragione della differenza. Questo libro, scritto da uno scienziato di chiara fama, guida il lettore nel regno iridescente dei suoni. Dal fremito di una corda d'arco al sibilo d'una canna mozza, al vento, alla distinzione delle sette note, sino alle più recenti asserzioni della scienza ed a certe teorie nuovissime, il lettore vien condotto, quasi senza che egli se ne accorga, di fronte al rivelatore d'un grammofono e alla manopola della radio domestica. Pitagora diceva che tutto nella natura è numero e l'autore ci mostra come anche dietro ad alcuni fenomeni in apparenza molto complessi vi siano dei numeri. Perchè piangevano al primo sorger del sole i colossi di Memnone che erano di pietra? Perchè al par di due anime, anche certi corpi vibrano in simpatia, acusticamente, se sulla loro forma, in apparenza diversa, la Natura ha, per così dire, iscritto uno stesso numero? Una volta chiuso il libro il lettore potrà dirsi di aver letto « un bel libro ». Tale è infatti quell'opera che ci rivela un aspetto della bellezza.

Volume di 312 pagine con 9 tavole f. t., L. 14,—

AVVENTURE DEL PENSIERO

VOLUME XXXIII°:

SCIENZA E MUSICA

DAL CENTRO DELLA TERRA ALLA STRATOSFERA (*Viaggio nella Terra, nel Mare, nel Cielo*) *di* UGO MARALDI.

Il meraviglioso progresso della scienza moderna apre nuovi spiragli nelle tenebre del grande mistero, e consente di intraprendere un viaggio ideale nell'Universo invisibile. Un vagabondaggio dal centro della Terra, ove arde la lampada di una misteriosa vita, alle città ed ai continenti sommersi negli abissi oceanici, dal tetto del mondo al deserto siderale popolato da una folla di fantasmi, rivelerà alle nostre anime nuove fonti di poesia e sconosciute forme di bellezza ultra terrena.

BREVE STORIA DELLA SCIENZA di SHERWOOD TAYLOR.

Una storia illustratissima della scienza vista attraverso le sue applicazioni e i fatti fondamentali, dalle età remote ai nostri giorni.

FRONTESPIZIO.

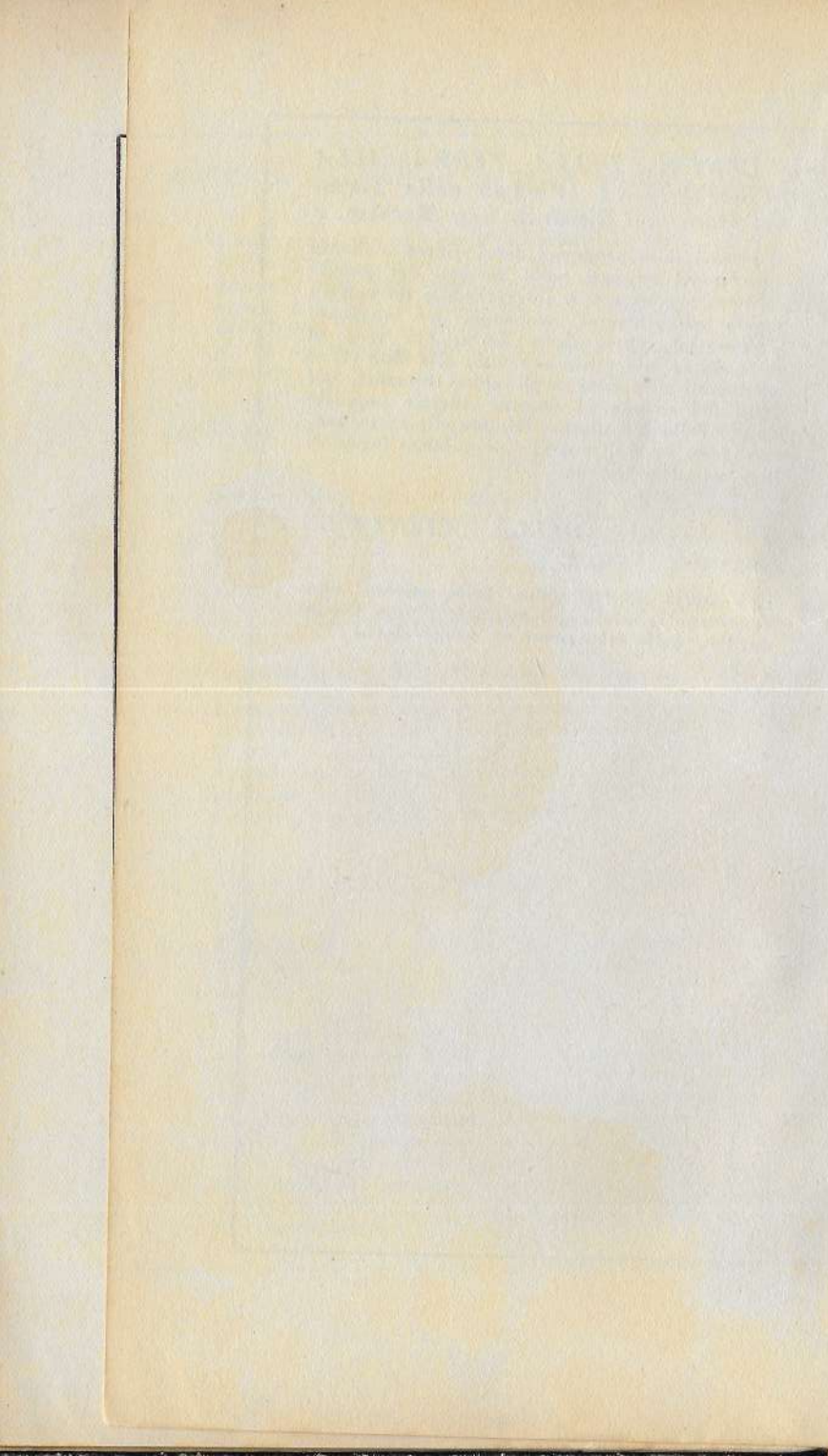



Fig. 1. - Sumèri che danzano al suono della lira, e marcano il tempo percuotendo ciascuno due legni ritorti (2700 a. C.).

DA UNA TOMBA REGALE A UR, IN CALDEA.

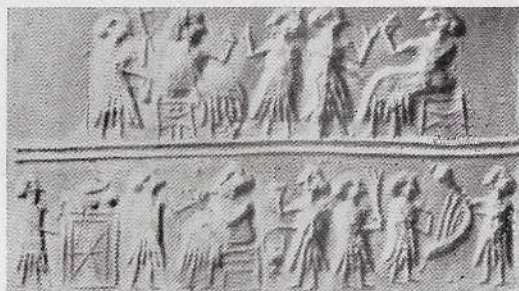



Fig. 2. - Sumèri, intenti a suonare un'arpa tetracorda, a forma d'arco e altri strumenti (2700 a. C.).
Dalla tomba della Regina Shubad a Ur (Caldea).

I SUMÈRI E LA LORO MUSICA, 4600 ANNI OR SONO

SCIENZA E MUSICA

DI

JAMES JEANS

EDITORE
VALENTINO BOMPIANI
1940-XVIII MILANO

CAPITOLO PRIMO

INTRODUZIONE

Quel faro possente che è la scienza moderna, va esplorando col fascio dei suoi raggi sottili e penetranti, le tenebre che avvolgono i secoli trascorsi, i « corridoi del tempo » come li chiamò il poeta (1), e ci svela, in modo mirabile, le origini prime della vita terrestre e la sua graduale e sorprendente evoluzione.

In un tempo remotissimo, scorgiamo il fenomeno della vita, sorgere da inizi quanto mai oscuri. Furon forse organismi semplicissimi, monocellulari, viventi sulle spiaggie marine, che la natura destinò a quella graduale evoluzione, a quell'incessante progresso di complessità che li doveva poi condurre sino ad assumere la forma dei nostri mammiferi superiori e poi quella dell'uomo stesso, l'opera più complicata che sia mai uscita dal laboratorio di madre natura.

Col passare dei millenni, l'essere vivente si fa sempre più complesso e, per coadiuvarlo, la natura provvede a fornirgli un congegno di organi sensori che l'aiuteranno a muoversi sulla superficie terrestre, a

(1) Longfellow: Proemio al « Waif ».

procurarsi il cibo e, d'altra parte, ad evitare che altri esseri viventi lo afferrino per cibarsene a lor volta.

Al musicista interessa particolarmente uno di codesti organi: quello cioè dal quale ha avuto origine il nostro udito.

Osservando un pesce, è facile rilevare, sotto la pelle che ne ricopre il corpo (dal capo alla coda, su ognuno dei lati) la presenza di una serie di minuscole aperture o cavità. Inferiormente a queste si trova un organo noto col nome di « linea laterale » che i naturalisti ritengono serva al pesce per percepire ogni eventuale variazione di pressione nel proprio ambiente, per avvertire le correnti e i vortici che egli va attraversando, e in speciale modo, per rilevare la presenza ostile di un altro suo simile, quando quest'ultimo sia di grossa mole e si avvicini per afferrarlo.

Sembra che anche i tipi di pesci primordiali fossero dotati di questa « linea laterale ». In un secondo tempo quella cavità che si trovava più vicina alla testa del pesce assunse una forma più complessa, divenne cioè quella struttura ossea nota col nome di « labirinto » che si trova in tutti i vertebrati, compreso l'uomo.

Il labirinto è formato da alcuni tubicini nei quali scorre un liquido speciale; la parte preponderante di esso va a formare tre canali semicircolari, posti, l'uno con l'altro, ad angolo retto; come vedesi in fig. 1.

In certi casi il numero dei canali può ridursi a due e anche a uno solo.

Quando l'animale volge la testa, oppure la parte superiore del corpo, il liquido che si trova nei canali semicircolari, per inerzia, ritarda un po' il pro-

prio movimento e va poi a soffregar leggermente una serie di corpiccioli della forma e della sottigliezza di un pelo. In ogni canale ve n'è uno e quando questi peli si piegano, essi, così facendo, trasmettono una serie di impulsi al cervello; danno a quest'ultimo il senso dell'avvenuto mutamento di direzione ed iniziano una serie di movimenti riflessi per controbilanciare il mutamento stesso.

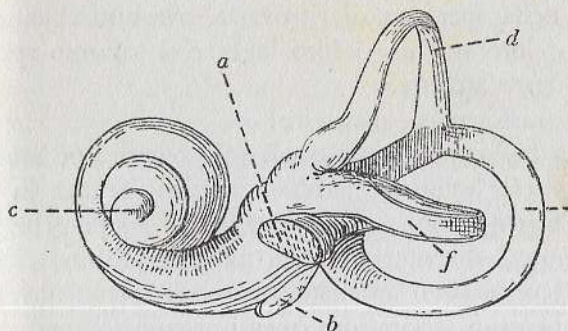



Fig. 1. - Il labirinto, nell'orecchio umano, ingrandito 5 volte. I tre canali semicircolari son posti a destra (*d*, *e*, *f*), mentre la coclea si trova a sinistra *a* è la finestra del vestibolo; pervengono ad essa le vibrazioni trasmesse dalla membrana del timpano. Scorgiamo in *b* la finestra della chiocciola, la cui funzione spiegheremo in appresso.

Per quanto la funzione di tali organi sia insita alla nostra natura dato che essi servono, fra l'altro, a farci recuperare l'equilibrio quando stiamo per cadere, non sempre gli uomini ne avvertono l'esistenza e il possesso. Quel senso di stordimento che ci coglie quando, facendo pernio sul piede, giriamo attorno vorticosamente, è anche dovuto a tali organi e così pure il « mal di mare ».

Ora, un apparecchio semplice come quello che abbiamo descritto poteva bastare tutt'al più ai pesci primordiali, che vivevano esclusivamente nell'acqua,

ma, una volta mutate le condizioni ambienti, finì col dimostrarsi insufficiente.

Chi ha qualche dimestichezza con la geologia, sa che, circa 300 milioni di anni or sono, la terra subì un lungo periodo di spaventosa siccità, durante la quale i mari, i laghi e le paludi vennero inesorabilmente prosciugati. Si comprende facilmente come, di un simile fenomeno, fossero proprio i pesci a soffrirne; essendo venuta a mancare l'acqua, molti di essi, nella speranza di ritrovarla, avranno abbandonato i loro stagni e i loro laghi e si saranno spinti sulle terre asciutte.

O trasformarsi, o morire!

Un bivio questo nel quale solo coloro che avevano spiccate tendenze anfibie, potevano restare in vita. Di generazione in generazione, i sopravissuti finirono col diventare animali terrestri: furono cioè i nostri primissimi antenati. In questa forma novella, cosa potevan servire loro quegli organi dei quali inizialmente si eran valsi per percepire le differenze di pressione, nell'acqua? Occorreva loro, piuttosto, un'organo col quale avvertire i mutamenti di pressione *nell'aria,* inquantochè a questi eran connesse le percezioni auditive e quindi l'eventuale presenza di cibo o di un pericolo, di amici o di aggressori.

A poco a poco, il vecchio organo, ormai inutile, si trasformò e dette origine al nuovo. Le varie fasi di questa metamorfosi, formano un capitolo interessantissimo (oseremo dire quasi incredibile) della Fisiologia.

Una porzione limitata di quella struttura ossea che abbiamo chiamata labirinto, si assottigliò gradatamente sino a diventare una membrana pellicolare, la quale, per la sua sottigliezza e pieghevolezza, è tale da poter trasmettere ogni variazione di pres-

sione dell'aria ambiente al liquido che si trova in quei canalicoli di cui abbiamo parlato. Ma, nel frattempo, anche il labirinto aumentò le proprie dimensioni, divenne più complesso e meno imperfetto. In quello del ranocchio, ad esempio, si nota una piccola protuberanza, la quale, man mano che ascendiamo i vari gradini della scala animale, si trasforma e si evolve vieppiù; va a formare la « coclea » e cioè la parte essenziale dell'orecchio dei vertebrati. A pag. 15, fig. 1, vediamo come si presenti, esternamente, questo elemento dell'apparecchio auditivo, elemento complesso e intricato quant'altri mai. In seguito ne descriveremo la struttura interna, ma, al punto a cui siamo giunti, basterà dire che la coclea può essere paragonata alla cassa, alla tavola armonica e alle corde di un pianoforte con un enorme numero di corde (tremila, negli uccelli, sedicimila nei gatti, e, finalmente, ventiquattromila nell'uomo). Si pensi inoltre, che il tutto è ridotto alle dimensioni di un piccolo pisello.

L'animale si giova della coclea non soltanto per udire i suoni ma altresì per scinderli nelle varie note che li costituiscono. Agli effetti della sopravvivenza, questa facoltà di analisi dev'essere stata preziosa per gli esseri primordiali, giacchè un suono, una volta analizzato, è più facile ricordarlo. Se, inizialmente, un certo suono è stato, per forza di cose e di circostanze, consociato con la sensazione di un imminente pericolo, avverrà spontaneamente di reagire ad esso, quando lo si oda nuovamente, giacchè la sensazione del pericolo sorgerà subito, ai nostri sensi, per associazione di idee. Si pensi, per esempio, al rabbioso ululato di un automezzo di pubblica utilità e all'urgente bisogno di proteggerci che l'improvvisa sua corsa desta in noi.

Se, oggi, gli uomini sono dotati di orecchi, lo si deve a un processo del genere. Infatti dell'udito, in un primo tempo, l'uomo si valse esclusivamente come di ausilio, nella « *lotta per l'esistenza* ». Poi venne il giorno in cui l'uomo si accorse di poter disporre di una facoltà e di una risorsa, di diversa natura: scagliando una freccia, ad esempio, la corda dell'arco dava un suono particolare, vibrando, e quel suono era gradevole, al suo orecchio. Oppure quando il vento, soffiando sul bordo di una canna spezzata, ne traeva un suono, quel certo suono, perchè diverso dagli altri, gli piaceva. Nacque così la musica e da quel giorno ad oggi, non si contan più coloro, nel tempo e nello spazio, che hanno dedicato ogni loro energia alla ricerca di nuovi suoni, che dessero gioia all'udito, suoni che si prestassero ad essere gradevolmente fusi in un unico concerto e questa intenzione, una volta attuata, ha fatto sì che la musica oggi costituisca un fattore predominante nella vita dei popoli civili.

IL SENSO DELL'UDITO

Con ritmo lento e pur preciso, la vita animale ascendeva, grado a grado, verso le forme più alte della propria evoluzione e, frattanto, nascevano e si perfezionavano i vari sensi. Fra questi, l'udito fu il più tardo a manifestarsi e l'ultimo, quindi, a conseguire una relativa perfezione.

Gli altri sensi, nel frattempo, avevano già raggiunto uno sviluppo notevole e, fra questi, la vista era divenuta talmente importante da conservare, in avvenire, il posto di predominio, sugli altri sensi, che tuttora le compete.

Si comprende facilmente come per la maggior

parte degli esseri viventi la facoltà visiva debba essere stata sempre più indispensabile dell'udito e, sia che ci riferiamo al piacere che da essa ci proviene o che la consideriamo in funzione diretta al nostro benessere materiale, dobbiamo pur riconoscere che ciò si è mantenuto vero anche a moltissimi secoli di distanza sino ai giorni nostri. Se, nell'imminenza di una sciagura o di una mutilazione, ci fosse dato di scegliere, non vorremo noi forse perdere qualunque altro senso, pur di conservare la vista?

Durante la veglia, di solito, ci si vale contemporaneamente della vista e dell'udito, ma le nostre percezioni visive sono quasi sempre più intense di quelle auditive. La vista ci procura un diletto maggiore di quello che, spesso, attribuiamo all'udito e perciò è sorta in noi l'abitudine di prestare quasi tutta la nostra attenzione a ciò che vediamo. Per quanto invece riguarda l'udito, udiamo sì, ma quasi distrattamente. Non solo ma, di fatto, la vista e l'udito non si fondono bene assieme; diremmo quasi che essi lottano l'una con l'altro, e, nella gara delle impressioni, è quasi sempre la vista che ha la meglio. Non è forse vero che quando siamo a teatro, spesso ci sfugge la musica per l'interesse eccessivo col quale seguiamo la scena? Perchè la mente porga la dovuta attenzione a quel che udiamo, occorre che essa non sia fuorviata da quanto appare alla vista. Adempiuta questa condizione, l'udito si acuisce e discerne meglio i vari suoni. Ciò spiega perchè, spesso, i ciechi divengano ottimi musicisti e perchè anche coloro che ci vedono, preferiscano talvolta ascoltare la radio all'oscuro. Durante l'audizione di un concerto taluni, per concentrare l'attenzione, preferiscono chiuder gli occhi anzichè seguire le dita del pianista o le labbra di colei che canta.

L'ORECCHIO UMANO

La parte esterna e quindi visibile del nostro orecchio ci appare simile a una conchiglia, ed è, probabilmente, quanto oggi resta di un primitivo « collettore di suoni ». Nella parte inferiore del padiglione scorgiamo un'apertura: il cosidetto « meato » o canale auditivo. Al termine di esso, a una profondità di circa due centimetri e mezzo, si trova una piccola membrana, molto delicata, dello spessore di circa mm. 0,075. È di forma pressochè ovale, alta circa otto millimetri e larga quasi dieci.

È tesa, questa membrana, su una struttura ossea, che opportunamente la incornicia, sì da far pensare alla pelle di un tamburo, ed è stata denominata: « membrana del timpano ».

Dopo aver percorso l'aria circostante i vari suoni pervengono al nostro orecchio sotto forma di onde, allo stesso modo di quelle che vediamo talvolta increspare la superficie del mare o lo specchio di un lago. Di esse, alcune si inoltrano entro il canale auditivo (piccola ampolla lunga circa due centimetri e mezzo) e finalmente giungono a quello dello schermo o barriera, che è il timpano.

Quivi giunte si arrestano e la pressione che su di esso esercitano, segue fedelmente il loro moto che è ondulatorio. Può quindi avvenire che le suddette variazioni di pressione determinino la vibrazione del timpano. Quando le vaste onde del mare si infrangono contro una diga, i nostri sensi avvertono il tremore che segue il ripetersi del cozzo e, anche se non ci vogliamo fidar dei sensi, un delicato sismografo, a varie miglia di distanza, lungi dal mare, registrerà fedelmente il moto ondoso. In modo analogo, le onde sonore esercitano una certa pressione sul no-

stro timpano e, come già detto, possono determinarne la vibrazione.

Vi è peraltro una differenza sostanziale e cioè: la diga, per il continuo cozzo dei marosi, può cedere e crollare in pochi anni, mentre il timpano possiede la virtù di rinnovarsi continuamente e di serbar quindi, pressochè intatta, la propria efficienza.

Facoltà questa meravigliosa quando si pensi che, anche in seguito ad un'esplosione e conseguente demolizione del timpano, bastano generalmente poche settimane perchè esso si formi nuovamente e sia in grado di funzionare, come prima.

La sensibilità di quest'organo è sorprendente: basta il più lieve sommovimento nell'aria ambiente perchè il timpano si muova. Perchè il nostro cervello avverta un suono basta un'onda sonora talmente debole da spostare l'aria circostante per un tratto lungo appena due miliardesimi e mezzo di millimetro.

La variazione di pressione provocata da una onda sonora di questa debolezza rappresenta $1/10^{10}$ (al denominatore figura un uno seguito da 10 zeri!) di un atmosfera. Concludiamo pertanto che l'orecchio umano è infinitamente più sensibile di qualsiasi barometro che sia stato mai fabbricato. Infatti un barometro normale può tutt'al più avvertire la differenza di pressione che intercede fra, poniamo, il pianterreno e il primo piano della nostra casa o, meglio, un'ascesa di qualche metro in collina. Invece la variazione di pressione corrispondente a quell'onda sonora di cui sopra, rappresenta — spazialmente — uno spostamento verticale di mm. 0,0008. Quando, in segno di assenso, accenniamo lievemente col capo, la variazione di pressione che al movimento consegue è più che sufficiente per far muovere il timpano e se non udiamo un suono ciò è dovuto al

fatto che non smuoviamo il capo con la rapidità che sarebbe necessaria alla percezione sonora. Infatti, perchè al cervello giunga un messaggio del genere occorre che la variazione di pressione sia ripetuta con ritmo molto celere. Non è quindi che il nostro timpano manchi di sensibilità e in seguito vedremo il perchè di questo fatto.

Nelle immediate vicinanze del timpano, dietro ad esso, troviamo la serie dei cosidetti « ossicini ». Il primo di questi è a contatto con esso mentre l'ultimo preme contro la « finestra del vestibolo », quella membranella tesa e cedevole della quale abbiamo già parlato. Ricordate i vecchi campanelli che oggi non usan più? Ebbene: gli ossicini fanno pensare al filo di ferro che trasmetteva alla campanella la stratta data al pendaglio esterno. Dalla « finestra del vestibolo » il moto passa al liquido che si trova nel labirinto e perviene alla coclea (l'abbiamo paragonata ad un pianoforte grande come un pisello). La funzione della coclea è tuttora poco chiara anche agli occhi dei fisiologi; sappiamo solo che da essa emerge un pennello di nervi e che quando il timpano vibra, questi peluzzi sensitivi conducono al cervello impulsi appena percettibili di elettricità e vi provocano sensazioni corrispondenti, appunto, al moto vibratorio del timpano.

COME AVVIENE LA PERCEZIONE AUDITIVA

Per farsi un'idea un po' chiara e precisa del come avviene che noi udiamo, vediamo di stabilire un parallelo fra il processo auditivo e l'orecchio, un telefono e la relativa comunicazione.

La figura n. 2 ci mostra gli elementi essenziali del nostro paragone. A destra scorgiamo l'orecchio aperto, all'introspezione, sino al timpano *d*. A sinistra, invece, ecco il telefono: in sezione, per farcelo vedere, sino al diaframma *D*. È facile rilevare una certa simmetria fra i due strumenti. La cartilagine del padiglione e l'osso dell'orecchio corrispondono infatti a quella parte che, nel telefo-

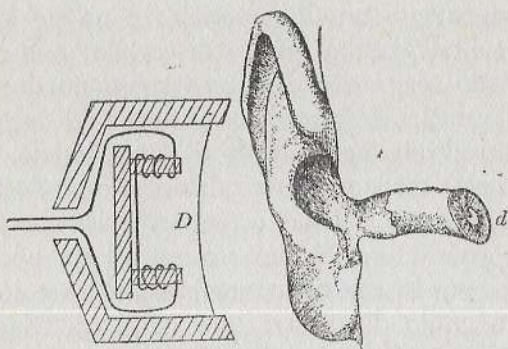



Fig. 2. - Rappresentazione schematica del processo auditivo. La funzione dell'orecchio somiglia un po' a quella del telefono: con i dovuti cambiamenti. Quest'ultimo, infatti, trasforma gli impulsi di una corrente elettrica in altrettante vibrazioni del proprio diaframma *D*. L'orecchio, invece, fa sì che le vibrazioni della membrana del timpano *d* si mutino in impulsi elettrici e questi inducono, nel cervello, le percezioni auditive.

no, è di bachelite o altra resina sintetica; la membrana del timpano (*d*) corrisponde alla lamina metallica (*D*) del telefono.

Anche la lamina *D*, come il timpano, ha varie parti, dietro a sè, ma di tale apparecchio, in figura, emergon solo i due estremi di un conduttore metallico. È il filo del telefono: l'apparecchio di colui che riceve la comunicazione può essere a varie miglia di distanza. Lungo il filo corrono gli impulsi elettri-

ci corrispondenti alle parole pronunciate davanti al microfono. Il telefono del destinatario provvede a trasformare in vibrazioni del proprio diaframma gli impulsi elettrici che han percorso il conduttore. Così facendo compie una funzione opposta a quella dell'orecchio, il quale, come abbiam visto, trasforma in impulsi elettrici le vibrazioni del timpano.

L'apparecchio che si trova dietro alla lamina o diaframma del telefono consta, essenzialmente, di un magnete di un tipo speciale: è un po' diverso dalla solita calamita a ferro di cavallo; non è tutto di acciaio magnetico e da esso sporgono due cilindretti o nuclei di ferro dolce. Attorno ad essi troviamo vari avvolgimenti di filo di rame, isolato. Ricordiamo cosa dicono i trattati di fisica, capitolo « Elettro-magnetismo ». Una corrente elettrica che percorra un conduttore avvolto attorno ad un nucleo di ferro, desta in esso una forza magnetica e lo pone così in grado di attrarre quei corpi (di ferro o di acciaio) che gli son vicini. Ciò avviene, peraltro, sinchè dura la corrente. Nel nostro caso il magnete di base ai due poli di ferro dolce attrae la lamina (*D*) del diaframma continuamente (la lamina infatti è sempre un po' ricurva verso il magnete). Quando poi un impulso elettrico percorre gli avvolgimenti dei cilindretti, l'azione magnetica in essi destata si somma alla precedente e il diaframma viene ulteriormente attratto.

Durante una conversazione telefonica, l'intensità della corrente non è costante; varia invece continuamente e determina la vibrazione del diaframma. Questi, a un dato istante, sarà attratto vivacemente; un istante dopo, con minor forza; quindi, per un attimo, non subirà attrazione alcuna e così via. Ogni volta che la lamina subisce un'attrazione, si sposterà

un po' verso i due nuclei, poi riprenderà la sua posizione verso destra e, così facendo, sospingerà una breve colonna d'aria verso il timpano, il quale, in conseguenza, si sposterà un po' verso destra anch'esso. Quando invece la lamina viene attratta verso i nuclei, si produrrà una lieve rarefazione nella colonna d'aria che intercede fra la lamina e il timpano. In conseguenza anche il timpano si sposterà un po' e, questa volta, verso sinistra.

Concludendo, possiamo dire che gli spostamenti del timpano riproducono fedelmente quelli della lamina (l'aria fornendo il « mezzo »); quelli della lamina, a lor volta, sono in funzione al variar d'intensità degli impulsi elettrici nel filo conduttore.

Nell'orecchio invece avviene un fenomeno opposto a quello ora descritto. Mentre, infatti, nel ricevitore telefonico, le variazioni d'intensità della corrente vengono trasformate in vibrazioni del diaframma, nell'orecchio le vibrazioni del timpano vengono trasformate in impulsi elettrici, di intensità variabile, che percorrono i nervi, sino al cervello, e questi impulsi il cervello ce li fa percepire come suoni. Come questa trasformazione avvenga, lo vedremo in seguito. Pel momento non vi dispiaccia se torniamo... a telefono!

LE CURVE « IMMAGINI DEI SUONI » (FORME DEL SUONO)

Volendo si possono misurare le variazioni di corrente che avvengono nel filo del telefono valendoci, all'uopo, di alcuni semplici strumenti elettrici. Queste variazioni possono, altresì, venir tracciate su una striscia di carta. Si tratta di una traccia in tutto simile a quella che, nelle vetrine degli ottici, ci mo-

stra l'andamento della pressione atmosferica, rivelata da un barometro. In quegli apparecchi, un rotolo di carta millimetrata vien fatto scorrere orizzontalmente e *a velocità costante,* sotto una punta scrivente, collegata, quest'ultima, a un'asticella connessa al barometro.

Ogni volta che un certo organo del barometro accenna a muoversi, l'asticella, e relativa punta scri-

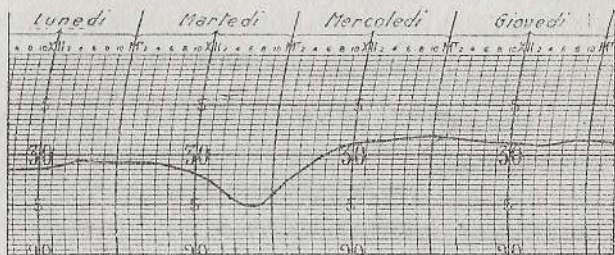



Fig. 3. - Un diagramma della pressione atmosferica. Lungo il tratto orizzontale (asse delle x) sono segnati i valori del tempo; sul tratto verticale (asse delle y) quelli della pressione, in pollici e in corrispondenza ai punti del tratto orizzontale. Vediamo, per esempio, che a mezzogiorno di Martedì la pressione era di 29,8 pollici (mm. 745). La curva è, in certo modo, la *forma della pressione.*

vente, si muovono ora verso l'alto ora verso il basso e ne risulta, sulla striscia di carta, una traccia (a forma di curva) che è « l'immagine delle variazioni di pressione ».

Ciò premesso, non è difficile concepire una striscia di carta, consimile, nella quale, lungo la direzione orizzontale del foglio si segni il passar del tempo (come nel rotolo del barografo) mentre lungo la direzione verticale (l'altezza della striscia) vengano segnate le variazioni d'intensità della corrente elettrica (nel barografo invece si trattava di variazioni di pressione).

Beninteso le unità nelle quali il tempo va suddiviso non saranno più giorni (come nelle striscie del barografo) ma piccoli tratti corrispondenti ciascuno, idealmente, a un centesimo di secondo. In modo analogo, nella direzione verticale (l'asse delle Ypsilon per chi conosca gli assi cartesiani) verranno segnate le unità di intensità di corrente. Probabilmente saranno milliampères o altra misura adeguata ma sempre piccolissima.

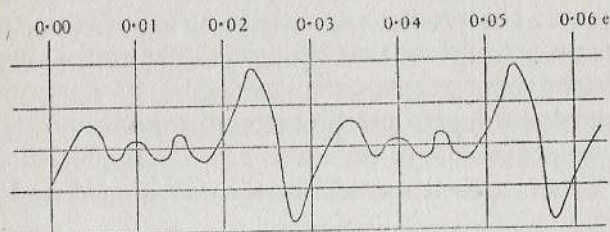



Fig. 4. - Diagramma rappresentante le variazioni della corrente in un conduttore. Nella figura precedente abbiamo visto l'andamento della pressione atmosferica: in questa vediamo le variazioni della corrente in un conduttore metallico. Sul tratto orizzontale i valori del tempo, in secondi, sul tratto verticale quelli dell'intensità di corrente (in milliampères).

Otterremo così una curva e questa sarà l'immagine, il diagramma, per esser più precisi, delle fluttuazioni di corrente. La scorgiamo in figura 4 e rileviamo che è della stessa natura di quella tracciata dal barografo.

Anche le vibrazioni della lamina D del telefono e della membrana del timpano possono esser rappresentate mediante un diagramma del genere, solo che, le unità segnate verticalmente (sull'asse delle y) saranno frazioni piccolissime di millimetro.

Concludiamo dunque che tanto la corrente che (per così dire) trasporta i suoni, quanto le vibrazioni

della lamina che trasmettono questi all'orecchio e quelle della membrana del timpano stesso, trovan la loro immagine in curve simili a quella che vediamo in fig. 4. Riflettendo altresì che le vibrazioni del timpano son corrispondenti a quelle della lamina e che questa, a sua volta, segue fedelmente le variazioni degli impulsi elettrici, dedurremo che queste curve avranno tutte una forma simile. Ognuna di esse rappresenta un certo suono o pure una serie di suoni. Sappiamo anche che qualunque suono o rumore, sia naturale che prodotto artificialmente, può venir trasmesso per telefono: ne deduciamo che tutti i suoni possono venir rappresentati mediante una curva del genere; ciò è vero per un colpo di tosse o uno starnuto, per la voce di un amico e per le combinazioni di suoni, sapientemente fusi da una grande orchestra.

Ai nostri giorni esistono vari strumenti il cui compito è appunto quello di tracciare la forma del suono; ricorderemo, anzitutto, l'oscillografo a raggi catodici. In questo libro abbiamo raccolto alcune fotografie di curve del genere ottenute mediante vari tipi di oscillografi. Le curve riprodotte nella tavola n. 1 sono tipiche del genere: la prima ci dà l'immagine grafica della vocale *a* nella parola « padre » cantata da un basso; l'altra la parola « rivers » (fiumi) cantata da un baritono, con accompagnamento orchestrale.

Prima che un'orchestra sia in grado di eseguire un brano musicale, occorre, naturalmente, la cooperazione di vari elementi: un compositore, i fabbricanti e i suonatori dei vari strumenti e finalmente il direttore d'orchestra. E tutti lavorano (o hanno lavorato...) per poter giungere a tracciare una curva! Se tutti questi signori hanno lavorato come si deve,

il suono che la curva rappresenta, sarà gradevole al nostro orecchio e indurrà, nella nostra mente, un certo diletto. Il compositore, scrivendo lo spartito ha tracciato — grosso modo — l'andamento della curva che egli desidera; egli ha, per così dire, specificati gli elementi principali e i vari momenti nei quali essi devono entrare in scena. Sarà affare del fabbricante di strumenti e dei professori d'orchestra di far sì che questi elementi risultino di buona qualità. Quanto al direttore d'orchestra, egli sta sul podio perchè ogni elemento entri al momento opportuno e spanda quel tanto di voce che occorre, in quel dato modo che egli solo intende. Tutta l'arte, tutti gli accorgimenti, le qualità brillanti o le lacune di questi collaboratori, tutto si fonde in una singola curva. Questa curva è « la sinfonia », è il concento, nè più nè meno, e il brano eseguito risulterà nobilmente emotivo oppure sciatto, musicalmente ricco oppure aspro, delicato o grossolano, a seconda della qualità della curva che lo rappresenta.

Allorchè viene inciso un disco, per la riproduzione di un dato brano, si ottiene una traccia ben tangibile di questa curva. Si tratta del bordo serpeggiante di quel solco circolare entro il quale corre la puntina, allorchè il disco gira sul piatto. Suonando il disco non facciamo altro che trasformare la curva nella musica che essa rappresenta. Man mano che la puntina scorre entro il solco circolare (o, per essere più precisi: man mano che il solco scorre sotto la puntina) le sinuosità ai lati del solco imprimono alla puntina un continuo sbandamento, da destra a sinistra e viceversa. L'estremo cilindrico della puntina trasmette questa sua vibrazione a un diaframma di mica e questo, a sua volta, lo trasmette all'aria ambiente. La colonna d'aria pone in vi-

brazione la membrana del timpano, in modo analogo a quanto abbiamo visto fare al diaframma laminare del telefono (fig. 2); senonchè, a causa della maggior distanza che separa la mica dai nostri orecchi insorge, a questo punto, una complicazione che a suo tempo considereremo. È così che la membrana del timpano vien posta in vibrazione seguendo fedelmente le sinuosità del solco impresso nel disco e il nostro cervello percepisce la musica che nella curva ha la sua traccia.

COME SI TRASMETTONO I SUONI

Se noi potessimo disporre di materiale perfetto e questi fosse ideale come qualità e illimitato, quantitativamente, non sarebbe davvero difficile fare in modo che la « curva » che i nostri orecchi ricevono fosse identica a quella creata dall'orchestra. In tal caso potremmo parlare di « trasmissione perfetta ». La musica udita potrebbe essere buona o cattiva, gradevole o no, ma almeno, sarebbe una riproduzione fedele del brano eseguito. Purtroppo, invece, noi viviamo in un mondo imperfetto, nel quale è pressochè impossibile una trasmissione perfetta.

Il caso più semplice di trasmissione avviene allorchè l'ascoltatore siede nella sala stessa ove sono i professori d'orchestra. L'unico mezzo di trasporto, in questo caso, è l'aria ambiente e pure, ciò non toglie che la curva, viaggiando dall'orchestra ai nostri orecchi, subisca una notevole distorsione. Infatti, in uno dei capitoli seguenti, vedremo che i muri della sala, il soffitto e l'impiantito, gli abiti stessi degli spettatori e persino le sedie e le poltrone vuote, tutto insomma riflette il suono in misura diversa. Ciò fa sì che una parte tutt'altro che trascura-

bile del suono che noi percepiamo sia stata riflessa almeno una dozzina di volte, prima di giungere ai nostri orecchi, e, naturalmente, ogni riflessione parziale ha mutato il carattere della curva sonora. Nel caso poi di una trasmissione radiofonica, prima che il suono giunga ai nostri orecchi, non si può dire quanti mutamenti abbia subìto quella benedetta curva! In quest'ultimo caso infatti ecco, a un dipresso, cosa avviene: la curva sonora prodotta dall'orchestra passa attraverso l'aria della sala alla lamina del microfono ivi installato; qui giunta si trasforma in corrente elettrica e vien convogliata telefonicamente sino alla stazione trasmittente. A questo punto la corrente in arrivo si somma a un flusso di elettroni che scaturisce dai filamenti di una certa serie di valvole; dalle valvole a un furibondo scorrer su e giù, pure di elettroni, lungo il filo dell'antenna trasmittente. Dall'antenna della trasmittente sotto forma di onde elettromagnetiche all'aereo della vostra radio che trasmette gli impulsi elettrici lungo tutti gli organi che la compongono, comprese alcune valvole ove questi impulsi si sommano ancora una volta al flusso elettronico in esse prodotto da altre sorgenti, finalmente la corrente (la curva sonora) giunge al diaframma o al cono dell'altoparlante, di qui all'aria e da questa (e abbiamo finito!) ai vostri orecchi.

Ora (ed è questo che volevamo porre in rilievo) ogni volta che la curva sonora passa dall'uno all'altro di questi « sostegni » essa subisce una certa distorsione: la sua forma primitiva si altera un po', le sue parti più prominenti e delicate si smussano, affluiscono ad essa un buon numero di impurità e di imperfezioni. Quindi, tutto sommato, è la qualità della curva che si muta... in peggio.

Tutti mutamenti questi, d'altronde, di poco con-

to, quando vengano paragonati a quelli che l'orecchio stesso apporta alla nostra curva. Vedremo, in seguito, come l'orecchio umano giunga persino a introdurre, arbitrariamente, nuove note musicali, in aggiunta a quelle effettivamente suonate dall'orchestra. Il nostro orecchio, a volte, fa anche un'altro scherzo (e ciò non soltanto alle persone affette da parziale sordità): assorbe cioè completamente talune note, alte o basse, e si rifiuta perciò di trasmetterle al cervello. Quand'anche a tanto non giunga, esso tende sempre a favorire certe note ai danni di altre, di guisa che i vari suoni vengono uditi in proporzioni completamente diverse da quelle nelle quali l'orchestra le suonò inizialmente.

Ci è dato adesso di scorgere il piano generale — diremmo il panorama — della trattazione che vogliamo esaurire. Considereremo, in un primo tempo, la genesi del suono; come esso giunga al nostro timpano e, da questo, come finalmente arrivi al cervello. Sappiamo già che qualunque suono (gradevole o sgradevole, a carattere di musica o semplicemente di rumore) può, in determinate condizioni, lasciar di sè una traccia (su carta, su cera e su vernice) a forma di curva. Ci proponiamo, dapprima, di esaminare le proprietà generali di questa curva, e di scoprire perchè certe curve arrechino diletto al nostro orecchio, mentre altre, invece, siano addirittura moleste. Prenderemo quindi in considerazione la trasmissione del suono, studiando il da farsi perchè la nostra curva mantenga inalterate quelle caratteristiche che la rendono atta a procurarci diletto e, dato sopratutto il gran numero di fasi che essa attraversa, sino a che punto possiamo intervenire per proteggerla da eventuali deformazioni. Finalmente discuteremo quegli strani mu-

TAVOLA I

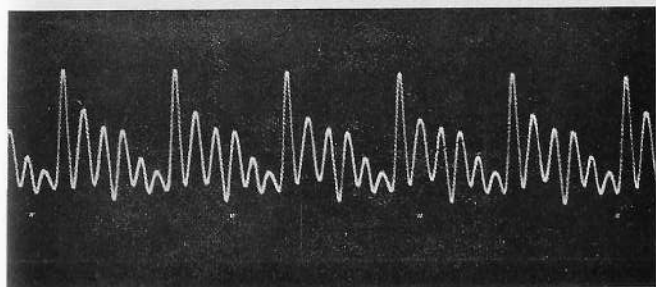



Fig. 1. - La curva rappresentante il suono della vocale « a » nella parola « father » (padre) cantata da una voce di basso, in tono di Fa. I punti bianchi sotto alla curva, corrispondono a intervalli di $\frac{1}{100}$ di secondo.

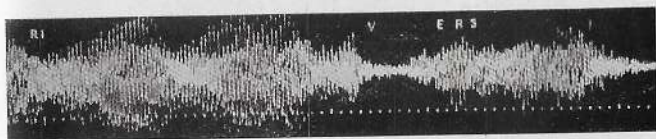



Fig. 2. - Diagramma della voce di un baritono in corrispondenza alla parola « rivers » (fiumi), con accompagnamento orchestrale. I puntini bianchi indicano intervallini di $\frac{1}{100}$ di secondo. In questo diagramma compaiono molti più periodi che nel precedente.

DIAGRAMMI TIPICI DI ALCUNI SUONI.

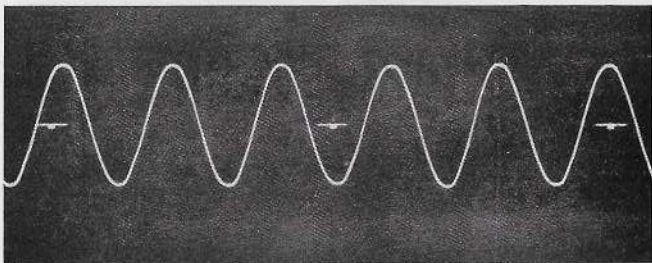



Fig. 1. - Forma del suono di una nota pura, emessa da un diapason. Frequenza della nota: 256 (Do ott. centr.). I punti bianchi corrispondono a intervalli di $\frac{1}{100}$ di secondo.

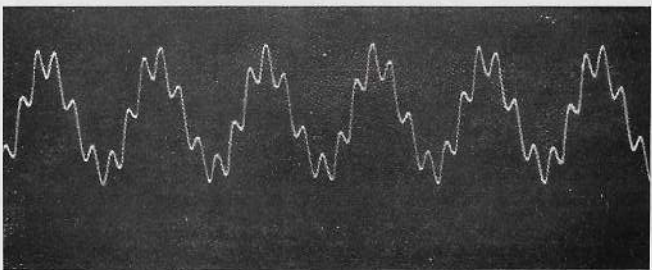
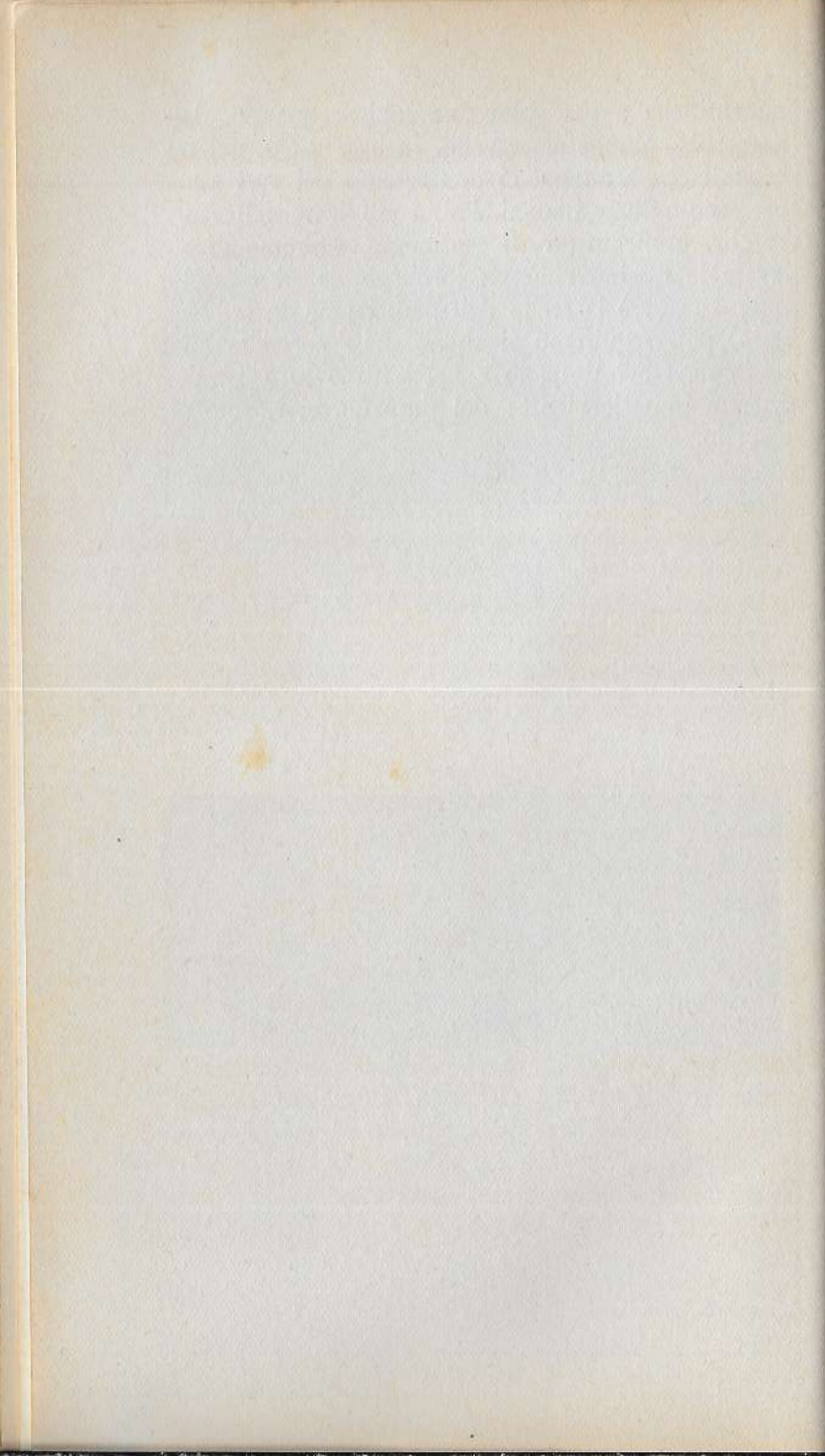



Fig. 2. - Forma del suono della stessa nota alla quale si somma il suono parziale. Quest'ultimo aggiunge i propri periodi (che sono più frequenti) a quelli della nota principale.

tamenti che a sua volta essa subisce quando, dall'orecchio, giunge al cervello. In base a ciò, nei tre capitoli che seguono, ci occuperemo dei vari sistemi per produrre i suoni. Poi, a giudicare dalle curve che, graficamente, li esprimono, vedremo di rilevare le qualità che son loro proprie. Il capitolo quinto tratterà la scelta dei suoni da produrre. Nel sesto, poi, seguiremo il suono dalla sorgente alla membrana del timpano e nel settimo lo accompagneremo ulteriormente: dal timpano, cioè, sino al cervello.

CAPITOLO SECONDO

DIAPASON E SUONI SEMPLICI

Abbiamo già visto che qualunque suono (o serie di suoni) può venir rappresentato mediante una curva. Perciò il primo problema che incontriamo sarà, logicamente, inteso ad identificare la relazione esistente fra quel dato suono — o serie di suoni — e la curva che lo rappresenta. In altre parole: vediamo come vanno interpretate le « curve del suono ».

SUONI SEMPLICI

La nostra sorgente di suoni sia un comune diapason. Abbiamo giudicato più opportuno di cominciare il nostro studio valendoci di un diapason, piuttosto che di una corda di violino e di una canna d'organo, perchè questo strumento, quando sia sollecitato, emette una nota pura. Come e perchè, lo vedremo in appresso. Per porre il diapason in vibrazione basta urtare contro un corpo duro i suoi due corni (son chiamati: rebbi) oppure soffregarvi sopra un archetto da violino. Il fenomeno è anche visibile: i rebbi, vibrando, assumono, al loro estremo, un contorno evanescente e indeciso. Anche il tatto ce ne rivela il moto: infatti, ponendovi un dito contro proveremo un senso di vivace titillazione. Se

poi non vogliamo fidarci dei sensi possiamo anche porre leggermente a contatto di un rebbio, allorchè vibra, una pallina di midollo di sambuco (analoga a quella degli elettroscopi) sospesa a un filo di seta: la pallina sarà vivacemente respinta.

Quando i rebbi del diapason vengon posti in vibrazione, essi trasmettono il moto all' aria circostante e questa, a sua volta, al nostro timpano. Il cervello, in conseguenza, avverte un suono. Che l'aria sia indispensabile alla percezione sonora ce ne potremo convincere ponendo il diapason, in vibrazione, entro la campana pneumatica ed estraendo da essa l'aria. Il contorno indeciso e tremolante dei rebbi ci manifesta che il diapason è tutt'ora in vibrazione, ma il suono non è più percettibile perchè è venuta a mancare la aria che serviva di mezzo per la conduzione delle vibrazioni al nostro orecchio.

Fig. 5. - Le vibrazioni di un diapason conferiscono un aspetto evanescente ai bordi dei rebbi. Una pallina di midollo di sambuco, toccando un rebbio in vibrazione, viene vivacemente respinta.

Vediamo ora come si giunge a registrare la traccia effettiva delle vibrazioni e ciò per studiarle nei loro particolari. Con un qualunque accorgimento fissiamo una setola rigida o una puntina da grammofono, piuttosto sottile, a un rebbio del diapason e, mentre questo vibra, facciamogli scorrere sotto una striscia piuttosto lunga di vetro affumicato. La disposizione suddetta appare in fig. 6; occorre tutta-

via aver cura che la puntina si muova su un percorso ben orientato e che la striscia di vetro abbia una velocità rigorosamente costante. Se il diapason

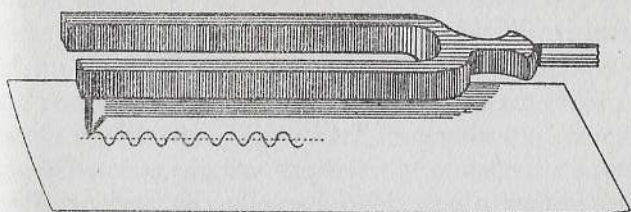



Fig. 6. - Facendo scorrere una striscia di carta o un vetro affumicato sotto a un diapason in vibrazione, si ottiene una traccia della *curva del suono* o *forma del suono*.

non vibrasse, si comprende facilmente che la puntina traccerebbe un solco rettilineo, nel leggero strato di fuliggine che aderisce al vetro. Quest'ultimo, visto contro luce, ci apparirebbe come in fig. 7.

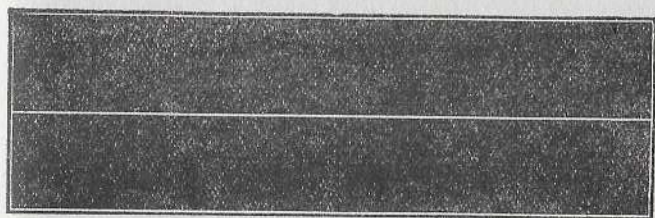



Fig. 7. - Traccia impressa dalla puntina, allorchè il diapason non vibra.

Di fatto, invece, esso ci apparirà analogo alla fig. 8 (copia di una fotografia); le vibrazioni hanno lasciato la loro traccia nello straterello di fuliggine e vediamo che il solco, anzichè rettilineo, è sinuoso. Ad ogni oscillazione singola della puntina (dall'alto al basso e viceversa) corrisponde, sul vetro, un'onda (un

picco e una cavità) e ciò si ripete sinchè vibrano i rebbi.

Necessariamente, è questa la « forma del suono » corrispondente alla nota emessa dal diapason. Se infatti, invertendo il processo, obblighiamo la puntina a seguire il solco sinuoso, il moto alterno (da un lato all'altro) di essa indurrà il rebbio a compiere un movimento simile e il diapason emetterà lo stesso suono di quando vibrava per proprio conto. Questo procedimento è analogo a quello che avviene allor-

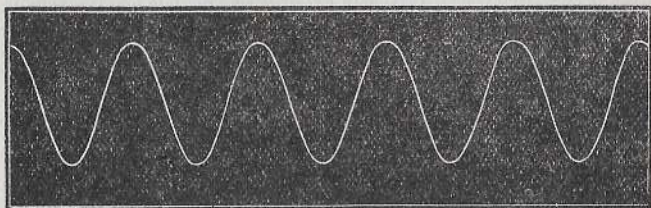



Fig. 8. - Traccia di un diapason in vibrazione. Le sinuosità corrispondono alle vibrazioni di un rebbio e, precisamente, un'ondulazione completa (picco e sinuosità) per ogni vibrazione in un senso e nell'altro.

chè ascoltiamo un disco di grammofono, con la differenza che, nel nostro caso, è il diapason e non il diaframma di mica a trasmettere all'aria le vibrazioni sonore.

Pur essendo semplicissimo, questo esperimento ha valso a mostrarci la relazione esistente fra il suono prodotto dal diapason e la sua curva. Abbiamo visto altresì che quest'ultima consiste in una serie di sinuosità tutte uguali fra loro.

Di particolare interesse è poi l'estrema regolarità di queste « onde »: hanno tutte la stessa forma e la stessa lunghezza; inoltre ricorrono tutte a intervalli perfettamente regolari. Orbene: *è proprio questa re-*

golarità la caratteristica della musica. Un rumore non traccia una curva come questa. Infatti, sinchè la puntina del grammofono scorre regolarmente entro le sinuosità del solco, udiamo musica; non appena invece incontra uno sgraffio, prodottosi accidentalmente sul disco, la puntina riceverà un urto e noi udremo quel rumore che... onomatopeicamente è stato definito: scrocchio! Deduciamo quindi che la regolarità è elemento basilare della nostra « curva del suono ». Ciò non toglie che, anche in fatto di regolarità, il troppo nuocia. Una regolarità immutabile finirà col produrre in noi un senso di monotonia, tutt'altro che gradevole. Il problema di disegnare una curva che arrechi piacere all'udito, non è poi dissimile da quello di progettare un edificio che dia gioia all'occhio. Con questo non vogliamo dire che un insieme di oggetti, scelti a caso e ammucchiati alla bell'e meglio, sia piacevole a vedersi; il nostro senso estetico esige un po' di regolarità, di ritmo e di simmetria. Elementi questi che, se spinti all'eccesso, producono nella nostra mente quel senso di monotonia che deriva dall'assenza di vita. Sotto un certo punto di vista, una caserma, in fatto di architettura, e il suono sempre uguale a se stesso e quindi monotono del diapason, si somigliano assai.

PERIODO, FREQUENZA E ALTEZZA DI SUONO

Durante i primi istanti di vibrazione di un diapason, l'orecchio percepisce una nota piuttosto sonora ma, di lì a poco, man mano che la vibrazione cede la propria energia all'aria circostante, il suono si andrà affievolendo. Però, salvo nel caso in cui il diapason sia stato colpito con particolare violenza,

notiamo che la nota emessa resta invariata in altezza, per tutto il tempo della vibrazione. Se, ad esempio, il diapason ha emesso inizialmente un LA (ottava centrale) udremo la stessa nota sinchè il suono tace (1). Tracciando un diagramma di questo moto particolare, col procedimento illustrato in fig. 6, troveremo che le onde diminuiscono progressivamente di ampiezza, man mano che il suono va scemando di intensità, ma restano però della stessa lunghezza.

Misurando opportunamente la velocità con la quale il rebbio del diapason scorre sul vetro affumicato, ci sarà facile calcolare quanto tempo occorre alla puntina per tracciare una singola onda. È, indubbiamente, il tempo durante il quale si compie una vibrazione isolata dal diapason e si tratta di una frazione impercettibile di secondo. Questo tempuscolo vien chiamato « periodo » della vibrazione. Facendo poi il conto del numero complessivo di vibrazioni che avvengono entro un secondo, avremo la cosidetta « frequenza » della vibrazione. Esperimenti, rigorosamente condotti, dimostrano che un diapason che emetta il LA dell'ottava centrale compie 438,9 vibrazioni al secondo, e ciò indipendentemente dalla maggiore o minore sonorità della nota.

La frequenza del DO, della stessa ottava, è invece 261 e ciò (come d'altronde per il LA) non solo quando il suono sia prodotto da un diapason ma per il DO emesso da un qualunque strumento musicale. Per esempio: se una sirena è costruita in modo tale che dal suo disco forato sfuggano 261 getti d'aria al secondo noi udremo il DO (ott. centr.).

(1) Se, inizialmente, il diapason è stato urtato con partico lare violenza, può darsi che la nota divenga leggermente più alta e ciò sinchè le vibrazioni non avranno ripreso il loro ritmo normale. - N. d. T.

Possiamo anche procedere in altro modo: si abbia una ruota dentata e si opponga all'urto dei suoi denti il bordo di un cartoncino (un biglietto da visita, va benissimo). Se ora regoliamo la velocità della ruota in modo tale che il cartoncino venga urtato da 261 denti al secondo, udremo di nuovo il DO (ott. centr.). Oppure: se una sega a vapore ruota ad una velocità tale da far sì che il disco dentato morda il legno 261 volte al secondo, l'orecchio percepirà nuovamente quel certo DO. Ancóra: il ronzio di una dinamo ha il suono del DO (ott. centr.) quando la corrente compie 261 cicli al secondo e ciò è vero altresì per tutte le macchine elettriche. Si trovano, in vendita, degli organi elettrici nei quali il fabbricante è riuscito ottimamente ad imitare il suono della canna che emette il DO (ott. centr.) mediante una corrente elettrica alternata che compie 261 cicli al secondo. E, per finire, quando un automobile corre ad una velocità tale che il pistone nel cilindro, dà 261 colpi al secondo, ha origine una vibrazione di frequenza 261, e, nel ronzare del motore, avvertiamo il DO (ott. centr.).

Tutto ciò dimostra che l'altezza di un suono dipende dalla frequenza della vibrazione che l'ha prodotto. Non dipende invece affatto dalla natura della vibrazione. Se la frequenza non è ben definita, neanche l'altezza del suono è ben definita perchè, in questo caso, il suono non è più musicale.

Allorchè una sirena, una sega a vapore, o una dinamo accelerano il loro moto, il suono che udiamo divien più alto, o, nel caso opposto, cala. Vediamo quindi che ai suoni alti corrisponde una frequenza elevata e viceversa. Se, nell'esperimento che abbiamo sopra descritto, impieghiamo una serie di diapason, ognuno dei quali emetta una delle note com-

prese nell'ottava centrale del pianoforte, troveremo che le varie note hanno le rispettive frequenze scritte loro a lato:

DO	261,0	FA	384,4	LA	438,9
DO♯	276,5	FA♯	396,1	LA♯	465,0
RE	293,0	SOL	391,1	SI	492,7
RE♯	310,4	SOL♯	414,3	DO 4ª ott.	522,0
MI	328,8				

Son queste le frequenze dei diapason o di qualunque altro strumento, purchè « di ugual temperamento » (vedi in appresso). Vi sono bensì diversi altri modelli tipici capaci di emettere suoni semplici e più ve n'era in passato. Per conoscere l'altezza delle note che i nostri antichi usavano, possiamo riferirci alla lunghezza delle canne degli antichi organi. Così facendo troveremo che, a seconda degli strumenti, una nota, che a giudicar dal nome, doveva essere la stessa, aveva invece frequenze ben diverse. In Germania, tanto per citare un esempio, il grande organo di Silbermann, nella Cattedrale di Strasburgo (1713) aveva un LA di frequenza 393; l'organo di Schnitgèr nella chiesa di Sant Jacopo ad Amburgo (1688) era accordato su un LA di frequenza 489; vale a dire quasi 4 semitoni sopra. Si resta sorpresi, poi, quando si pensa che la nota di base per la liturgia chiesastica della Germania del Nord, era stata previamente fissata da Pretorio (1619) imponendo un LA di frequenza 567. Fra il LA dell'organo di Strasburgo e questo LA, intercede una differenza di ben 6 semitoni! E come se ciò non bastasse, la musica profana veniva, quasi sempre, eseguita in una tonalità più alta di quella liturgica, cosicchè si venne a formare un « diapason da camera » ben distinto dal « diapason chiesastico ». An-

che in altre regioni riscontriamo simili diversità. Per quanto riguarda l'Inghilterra, l'organo di Padre Smith nella Chiesa della Trinità a Cambridge era intonato (1759) in base a un LA di frequenza 395 mentre il diapason appartenuto a Haendel (1751) emetteva un LA di frequenza 522,5; cinque semitoni sopra a quello della Trinità.

Nei primi decenni del 1700 si cercò attivamente di unificare il diapason ma, ciò nonostante, il LA oscillava sempre per le frequenze di 415 e 430. Per circa un secolo si mantenne entro i limiti suddetti, sinchè i compositori e i musicisti, desiderosi com'erano di dare un maggior risalto e maggior lustro al tono generale della loro musica, ripresero ad elevare la frequenza. Nel 1879 l'orchestra del Covent Garden di Londra aveva impostata la propria musica su un LA base di frequenza 450; in America poi il cosidetto « diapason da concerto » era un LA di frequenza 461,6.

Nel 1859 il Governo Francese nominò una Commissione di musicisti e di fisici onde proponessero un diapason modello, di generale adozione. La Commissione propose di basarsi su un LA di frequenza 435 e siccome, in seguito, un decreto legge confermò tale diapason, è tuttora questo il diapason usato in Francia e quasi ovunque in Europa. In America vien adottato spesso il LA di frequenza 440. Invece, in Inghilterra, ove si è soliti di accordare basandosi sul DO anzichè sul LA, il diapason è il DO (1.a ott.) di frequenza 522. Le frequenze delle altre note risultan quindi quelle esposte a pag. 42.

A prima vista, i valori corrispondenti alle frequenze ci potrebbero apparire scelti a caso mentre, riflettendo, comprenderemo che così non è.

Anzitutto constatiamo che il primo numero che

ci appare, il 261, è la metà precisa dell'ultimo, il 522. I nostri esperimenti han valso a dimostrarci che, in questo caso particolare, l'intervallo di un'ottava corrisponde al rapporto di 2 a 1, fatto questo che, in base ad altri esperimenti, si dimostra vero sempre ed ovunque: raddoppiando la frequenza di una vibrazione udremo un suono che è un'ottava più alto del precedente. L'intervallo di ottava è fondamentale nella musica di ogni tempo e di ogni regione; abbiamo visto or ora qual significato attribuirgli, fisicamente.

Noteremo altresì che l'intervallo che intercede fra il DO e il DO♯ corrisponde ad un incremento di frequenza di circa il sei per cento. Semplici considerazioni aritmetiche ci portano ad asserire che ciò è vero per qualunque altro intervallo di un semitono. L'incremento non può essere esattamente del 6 per cento giacchè, se ciò fosse, l'aumento complessivo nell'intiera ottava (12 di tali intervalli) sarebbe: $1{,}06 \times 1{,}06 \times 1{,}06...$ (dodici fattori in totale, ciascuno uguale a 1,06). I matematici rappresentano questo prodotto con la notazione $(1{,}06)^{12}$. Ora, operando avremo, come risultano: 2,0122, numero diverso da 2, evidentemente.

In uno strumento come il pianoforte o l'organo, di ugual « temperamento », l'intervallo citato, di ampiezza 2, vien suddiviso in parti uguali per tutti e dodici gli intervallini di un semitono ciascuno, il cui complesso costituisce l'ottava. E siccome la radice dodicesima di 2 è 1,05946, questo numero sarà appunto il rapporto delle frequenze di un semitono.

Moltiplicando successivamente per il fattore 1 e 05946, otteniamo la seguente tabella nella quale sono elencati i rapporti fra la frequenza delle note, ivi indicate, e quella del DO.

Rapporti delle frequenze entro l'ottava

$(\text{Do} = \frac{261}{261} = 1)$

DO♯	$= 1,05946$	SOL	$= (1,05946)^7 = 1,4983$
RE	$= (1,05946)^2 = 1,225$	SOL♯	$= (1,05946)^8 = 1,5874$
RE♯	$= (1,05946)^3 = 1,1892$	LA	$= (1,05946)^9 = 1,6818$
MI	$= (1,05946)^4 = 1,2599$	LA♯	$= (1,05946)^{10} = 1,7818$
FA	$= (1,05946)^5 = 1,3348$	SI	$= (1,05946)^{11} = 1,8877$
FA♯	$= (1,05946)^6 = 1,4142$	DO (ottava sopra)	$= (1,05946)^{12} = 2,0000$

La nota seguente, il DO♯ (ottava sopra) avrà, evidentemente, una frequenza che sarà $(1,05946)^{13}$ volte quella del primo DO naturale. Dato che (1 e $05946)^{12} = 2$, il DO♯ (ottava sopra) avrà due volte la frequenza del DO♯ (ottava sotto) e cioè $2 \times 1,05946$. E così via.

Aumentar la frequenza di una nota qualunque, di un fattore 1,05946, significa alzarla di un semitono e ciò è vero per tutta la scala. Un fatto questo che noi possiamo verificare accelerando la velocità di una sirena, di una sega a vapore o di un'altra qualunque delle macchine che abbiamo nominato. Il mezzo più semplice, però, ci appare quello di valerci di un disco sul quale sia inciso un brano per pianoforte. Di regola, i dischi son fatti in modo che, per avere una riproduzione fedele del brano musicale, devono compiere esattamente 78 giri al minuto. Se, accelerandone il movimento, facciamo sì che il disco compia $78 \times 1,05946$, cioè 82,6 giri, udremo lo stesso brano di prima (quando il disco girava alla velocità prestabilita di 78 giri) spostato però di *un semitono sopra.*

Dovremo anche stabilire univocamente la frequenza del diapason. Sia per la varietà dei diapason tuttora in uso, sia perchè conviene dal punto di vista dei numeri, si è deciso oggi di adottare, nei computi teorici, la frequenza base 512 per il DO (1.a

ott.). Così facendo avremo la tabella qui sotto riportata. Dalla nostra ad altre frequenze basilari che (eventualmente in altri testi) potessimo incontrare, il passo è facile. Così, ad esempio, per spostare da 512 a 522 la frequenza del DO (1.a ott.) basterà aggiungere il 2 per cento, dato che 522 è, con molta approssimazione, maggiore di 512 appunto del 2%.

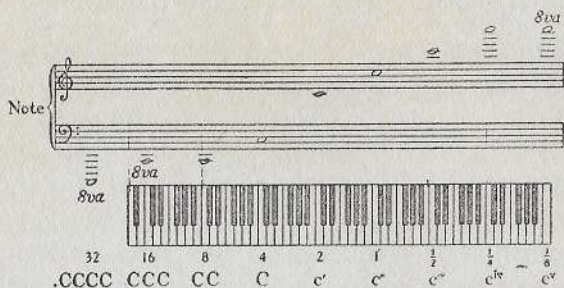



Fig. 9. - I simboli usati in questo libro sono quelli usati da Helmoltz (salvo una leggera modificazione). Li abbiamo riportati in figura per mostrare la loro corrispondenza con le note nel rigo, i tasti del pianoforte e la lunghezza delle varie canne dell'organo che tali note emettono.

Frequenza delle varie note dal DO
(*ottava dopo la controttava*) *al* DO (*ottava* 5ª)
[DO (1ª *ottava*) = 512]

NOTA	DO (dopo la controttava)	DO (controttava)	DO (ottava grande)	DO (ottava piccola)	DO (ottava centrale)	DO (1ª ottava)	DO (2ª ottava)	DO (3ª ottava)	DO (4ª ottava)
DO	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
DO♯	17	34	68	136	271	542	1085	2170	4340
RE	18	36	72	144	287	575	1149	2299	4598
RE♯	19	38	76	152	304	609	1218	2436	4871
MI	20	40	81	161	323	645	1290	2580	5161
FA	21	43	85	171	342	683	1367	2734	5468
FA♯	23	45	91	181	362	724	1448	2896	5793
SOL	24	48	96	192	384	767	1534	3089	6137
SOL♯	25	51	102	203	406	813	1625	3251	6502
LA	27	54	108	215	431	861	1722	3444	6889
LA♯	29	57	114	228	456	912	1825	3649	7298
SI	30	60	121	242	483	967	1933	3866	7732

LA SINUSOIDE

Esaminiamo adesso la forma di quelle « onde » di cui, nel capitolo precedente, abbiamo rilevato la regolarità e la lunghezza. È evidente l'estrema semplicità della loro forma, ma occorre altresì avvertire che quest'ultima non è una proprietà comune a tutte le « curve del suono ». Quelle che abbiamo visto finora sono semplici perchè semplicissimo era lo strumento che le produceva: il diapason. Misurando con precisione una di queste curve, riscontreremo che si tratta di un diagramma che i matematici ben conoscono. È infatti la « sinusoide », la curva del moto pendolare semplice, giacchè così vien chiamato il movimento della puntina che ha originato tale traccia.

Questa sinusoide e il moto pendolare semplice che l'ha determinata, rivestono una grande importanza nel campo delle scienze fisiche, meccaniche e in altri rami dello scibile. È sopratutto nel campo dei moti vibratori che il loro studio si rende indispensabile e ciò interessa in special modo la musica inquantochè i suoni son sempre originati dalle vibrazioni di una qualche struttura meccanica: una corda tesa, una colonna d'aria, la pelle di un tamburo, o un oggetto metallico, come, ad esempio, i piatti da orchestra, il triangolo, i tubi del vibrafono (marimba moderna) o quelli che imitano le campane. Sarà opportuno pertanto esaminare attentamente il fenomeno.

CENNI SULLA TEORIA DELLE VIBRAZIONI

Quell'insieme di parti che costituiscono una struttura meccanica o una macchina, dispongono sempre di almeno una posizione nella quale sono in ri-

poso. Se ciò non fosse avremmo tanti... « moti perpetui »! Questa posizione vien detta « di equilibrio ». Ora, quando ciò si verifica, esiste, fra le forze che sollecitano le varie parti (per esempio: il peso di un elemento della macchina da un lato e le spinte e trazioni che esso riceve dagli elementi circostanti) esiste, dicevamo, un perfetto compenso. Le forze suddette si bilanciano. Se però dall'esterno, giunge al nostro apparecchio una qualche sollecitazione — un moto, una spinta o altro del genere — l'equilibrio verrà a cessare e l'apparecchio assumerà una nuova posizione, nella quale le varie forze agenti sull'elemento dato, non si bilanciano più. L'elemento soggiace, allora, ad una « forza reattiva » che tende a ripristinarlo nella posizione precedentemente occupata.

Questa forza si fa sentire subito, riportando l'elemento verso la posizione originaria di equilibrio. Però, un istante dopo, essendo animato da una certa velocità, l'elemento, per inerzia, oltrepasserà quella tal posizione e si porterà a una certa distanza, dalla banda opposta. Quivi giunto verrà sollecitato in senso contrario, obbedirà a quest'ultimo impulso e accumulerà della velocità per oltrepassare nuovamente il segno. E così di seguito. Evidentemente, la traccia visibile del movimento sarà costituita da una serie di onde, in tutto simile a quella che ci aveva dato la puntina o setola, connessa al rebbio del diapason.

Orbene: un moto di questa specie vien definito col termine generico di « oscillazione ». Quando la oscillazione è di lievissima ampiezza, il moto vien detto « vibrazione ». Deduciamo quindi che quest'ultima è un caso particolare della prima e aggiungeremo che le vibrazioni hanno certe proprietà as-

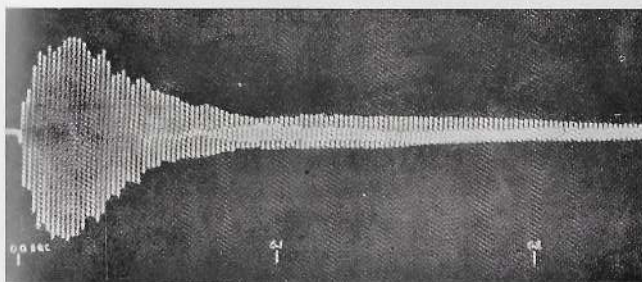



Fig. 1. - Rappresentazione grafica (forma del suono) di un Do (1ª ottava) di frequenza 516. Le suddivisioni, tracciate inferiormente, corrispondono a intervalli di $\frac{1}{10}$ di secondo, a partire dall'istante in cui il martelletto percuote la corda.

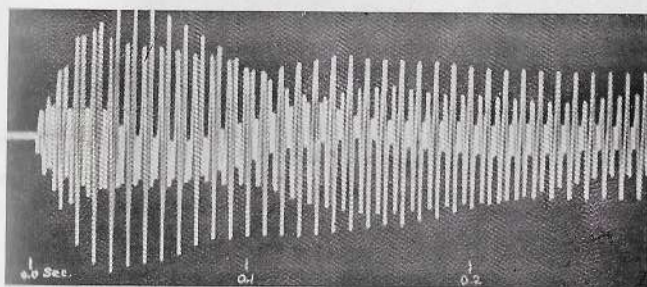



Fig. 2. - La « curva o forma del suono » di un Do (ott. picc.), di frequenza 128. Gl'intervalli di tempo sono, anche in questo esempio, di $\frac{1}{10}$ di secondo ciascuno.

Curve corrispondenti al suono del pianoforte.

Tavola IV

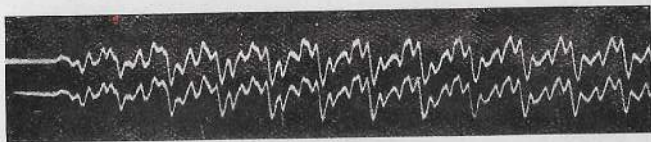



Fig. 1. - La prima traccia in alto, corrisponde ad una nota suonata da un celebre pianista; la seconda, inferiormente, è stata prodotta lasciando cadere un peso qualunque sul tasto del pianoforte. Si noti la perfetta similitudine delle tracce e si comprenda che agli effetti del suono, poco importa la differenza dei mezzi che l'hanno determinato.

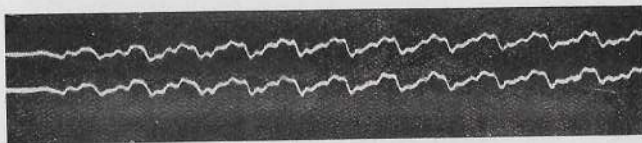



Fig. 2. - Altro esempio di curve del suono ottenute in condizioni analoghe al precedente caso.
Curva superiore: tasto suonato da un celebre pianista. Curva inferiore: la stessa nota emessa in seguito alla caduta di un peso sul tasto.

La curva del suono non rivela il « tocco » del pianista.

sai semplici che le oscillazioni non possiedono. In queste infatti si verifica che, quanto più l'elemento in questione vien rimosso dalla sua posizione di equilibrio, tanto maggiormente si fa sentire la forza che lo riporta addietro. Nella vibrazione invece abbiamo che: la variazione è *esattamente proporzionale* alla distanza percorsa da quello elemento che si era allontanato dalla posizione di equilibrio. Spostandolo del doppio dalla posizione di equilibrio vedremo che la forza che tenderà a riportarvelo sarà anche *doppia* di quella che in un primo esperimento l'aveva sollecitato.

Fig. 10. - Pendolo in posizione di equilibrio. Il peso è in riposo soltanto nel punto *C*. Spostandolo in *B*, esso tende, necessariamente, a tornare in *C*.

Semplici considerazioni d'indole matematica ci portano a concludere che quando si verifica questo principio i moti dei vari punti di quel corpo, o struttura, son tutti della stessa specie, e ciò indipendentemente dal corpo stesso. Un moto del genere si chiama: « moto periodico semplice ».

Ora, nel movimento del diapason, abbiamo un esempio concreto di tale moto. Un altro esempio (ed è forse la più semplice struttura meccanica che si possa immaginare) ci è dato da un grave qualunque sospeso a un filo, piuttosto sottile. Quando il peso si trova in *C*, esattamente cioè sotto il punto di sospensione, si ha la posizione di equilibrio. Ma se il peso vien rimosso lateralmente e tratto in una posizione adiacente (*B*), non manifestandosi più le condizioni di equilibrio. si comprende che il peso ten-

derà a tornare in C. La dinamica ci insegna a determinare in qual misura agisce la forza che tende a riportarlo in C. Purchè l'ampiezza dello spostamento BC si mantenga inferiore a un certo valore, troveremo sempre che la forza suddetta è *esattamente proporzionale all'arco BC*. Possiamo quindi asserire che questo è un moto periodico semplice. Fis-

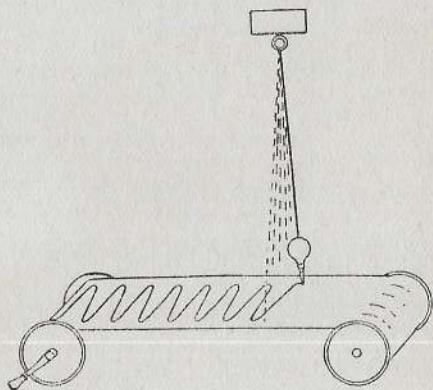



Fig. 11. - Come si registra la traccia di un moto pendolare. La curva risultante è una sinusoide, in tutto simile a quella che si ottiene con il diapason.

siamo, infatti, una punta scrivente al peso e facciamogli scorrere sotto una striscia di carta (vedi fig. 11): otterremo una sinusoide simile a quella tracciata dal diapason.

Se ora noi imprimiamo al pendolo un'oscillazione più ampia, la traccia risultante sarà ancora una sinusoide. Naturalmente le onde avranno dimensioni maggiori, ma il loro periodo sarà quello di prima e ci sarà così dimostrato che il pendolo compie lo stesso numero di oscillazioni al secondo, indipendentemente dall'ampiezza loro. Purchè, beninteso,

quest'ultima resti sempre nei limiti imposti alle « vibrazioni ». Abbiamo pure, in ciò, una verifica della celebre legge di Galileo: la durata delle oscillazioni di un pendolo dipende soltanto dalla lunghezza di esso e non dall'ampiezza dell'arco descritto (1). I nostri orologi a pendolo funzionano appunto in virtù di questa legge.

Abbiamo riscontrato una proprietà analoga nel diapason; infatti la sua frequenza rimaneva costante sia che l'avessimo sollecitato con un urto piuttosto violento o pure soffregato leggermente. Ciò è vero dunque per tutte le vibrazioni; la frequenza è indipendente dall'ampiezza dei loro moti e dall'energia della sollecitazione. E questo nei riguardi della musica è un fatto di grande importanza. Significa infatti che ogni strumento musicale in cui il suono avvenga per vibrazioni « andrà bene », come si dice di un orologio, e, così facendo, metterà una nota sempre della stessa frequenza, quindi della stessa acutezza e ciò a prescindere dall'intensità del suono. Se ciò non fosse, non è eccessivo asserire che non esisterebbe la musica, almeno come l'abbiamo sino ad oggi concepita. Provi il lettore a immaginare un'orchestra che si accinga ad una esecuzione sapendo che se una nota, per tutto il tempo della sua durata non verrà suonata con intensità *perfettamente costante,* diverrà una stonatura! I « crescendo » e i « diminuendo » potrebbero essere eseguiti soltanto *aggiungendo o togliendo* gradatamente un certo numero di strumenti! Una diminuzione di intensità nelle note di un pianoforte (o di qualunque altro strumento a percussione) condurrebbe a un mutamento

(1) Sempre trattandosi di oscillazioni di ampiezza relativamente piccola.

di frequenza, quindi di altezza, e ogni brano inizierebbe inevitabilmente con una specie di ululato e finirebbe in un gemito!

I musicisti ben sanno d'altronde che vi sono alcuni strumenti, nei quali l'acutezza della nota varia considerevolmente a seconda della forza con la quale essa vien suonata. Il flautista, per esempio, può spostare un po' il diapason del proprio strumento soffiandovi dentro più o meno fortemente e l'organista ben conosce quel lamentoso calar delle note che affligge l'orecchio quando manca la pressione. Nelle pagine che seguiranno tratteremo anche della emissione di suoni come i suddetti e vedremo che essi non son più prodotti da vibrazioni semplici come quelle del diapason o del pendolo.

VIBRAZIONI SIMULTANEE

Un dato mezzo può aver due o più modi di vibrare e può perciò emettere, contemporaneamente, diverse vibrazioni. Un ben noto principio di meccanica dice che, quando un dato mezzo vibra — sempre che le vibrazioni siano contenute nei limiti previsti — il moto di ciascuno dei suoi punti è: o un moto periodico semplice (pendolare) oppure il moto, più complesso, derivante dalla composizione di un certo numero di moti periodici semplici.

Un diagramma varrà a mostrarci come ciò possa aver luogo.

Supponiamo che, mentre il nostro diapason sta vibrando, noi lo percuotiamo, con un martello, sull'estremo di un suo rebbio. Udremo tosto un suono metallico, noto col nome di « suono parziale ». Un orecchio addestrato rileva che l'acutezza del suono emesso è due ottave e mezzo più alto della nota pro-

pria del diapason. Cos'è avvenuto? Il colpo di martello ha provocato nel diapason, una nuova serie di vibrazioni, di acutezza molto più alta della vibrazione che gli è propria. La traccia della vibrazione, *prima* del colpo di martello, era una sinusoide come quella che si vede in fig. 1 della tavola II. È la curva a onde più larghe in fig. 12 (*a*). Se invece trac-

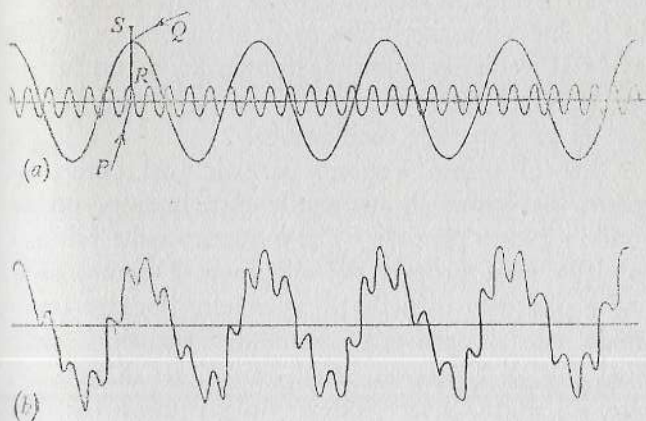



Fig. 12. - Come si compongono due vibrazioni. I periodi delle due sinusoidi in (*a*) stanno fra loro nel rapporto 6½ a 1. Componendo i due moti otterremo la curva che vedesi in (*b*), rappresentazione grafica fedele del suono di un diapason mentre emette il « suono parziale ».

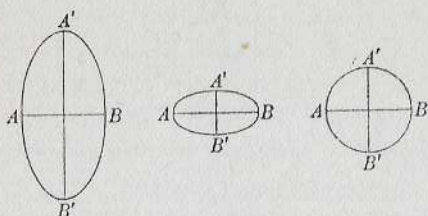
ciamo la sinusoide del suono parziale isolatamente, avremo la curva, a onde più frequenti e piccoline sempre in fig. 12 (*a*). È quest'ultima, la traccia di un moto periodico semplice che ha una frequenza sei volte e un quarto (6 1/4) maggiore della vibrazione iniziale.

Supponiamo adesso di eseguire la traccia delle due vibrazioni, contemporaneamente. Nell'istante che corrisponde al punto *P*, l'elemento che noi consideriamo ha compiuto un percorso equivalente alla di-

stanza *PQ* per effetto della vibrazione principale, e un altro, corrispondente a *PR,* per effetto della vibrazione assunta in seguito al colpo di martello. Le due lo spostano quindi per un tratto $PQ + PR$ e questa somma è uguale a *PS* se prendiamo $QS = PR$. Ripetendo, lungo tutta la curva, tale somma di spostamenti, otterremo la curva (*b*) in fig. 12 ed è questa, effettivamente, la traccia che si otterrebbe quando le due vibrazioni fossero contemporanee. Nella tavola II vediamo infatti la fotografia di un autentico tracciato ottenuto, con mezzi opportuni, valendosi di uno speciale oscillografo.

Oltre al primo « suono parziale » si percepisce spesso, nel corso di un simile esperimento, un secondo « suono parziale » che è quattro volte più acuto della nota propria del diapason. Diremo, anzi, che è piuttosto difficile di sollecitare il diapason in modo tale da provocare soltanto l'emissione della nota che gli è propria, senza intrusione di note più alte. Di solito, invece, otterremo un suono nel quale si sommano le tre note anzidette. Ciò non infirma affatto l'utilità del diapason come fonte di note pure, dato che quelle più alte si smorzan quasi subito e l'orecchio avverte soltanto la nota propria del diapason.

Vediamo, adesso, un altro esempio di vibrazioni simultanee e cerchiamo di imparar qualcosa di nuovo. Torniamo, per un momento, al nostro pendolo e facciamolo oscillare lateralmente, da sinistra a destra e viceversa. Il peso si sposterà lungo il tratto (arco) *AB* di fig. 11 e il suo moto sarà, come abbiam visto, un moto periodico semplice. Supponiamo altresì che quando il peso si trova in *B,* esso venga sollecitato, mediante un lieve buffetto, in direzione esattamente ortogonale ad *AB* (vale a dire:

attraverso al foglio, guardando la figura 11). Così facendo, provocheremo una nuova oscillazione in direzione perpendicolare ad *AB;* sappiamo già che anche quest'ultimo deve essere un « moto periodico semplice ». Dato poi che la frequenza di un moto pendolare dipende esclusivamente dalla lunghezza del pendolo, questa nuova oscillazione avrà la stessa frequenza della precedente. Il moto risultante è sorto quindi dalla sovrapposizione o composizione di due moti periodici semplici, di egual frequenza.

Figg. 13, 14 e 15. - Il peso di un pendolo conico, oscillando, descrive un'elisse o un cerchio.

Guardando il peso dall'alto, ci accorgeremo che esso si muove lungo un percorso chiuso e curvilineo attorno al centro *C*. Se il buffetto è stato piuttosto vivace, il pendolo si muoverà lungo un percorso elittico, piuttosto allungato (*AA' BB'* in fig. 13). Se invece la spinta è stata lieve il percorso sarà sempre un'ellisse ma allungata nella direzione opposta alla precedente (*AA' BB'* in fig. 14). Se poi la spinta è stata di forza esattamente pari a quella che ha provocato la precedente oscillazione da sinistra a destra, allora il peso descriverà un circolo (*AA' BB'* in fig. 15) ed avremo il cosidetto pendolo conico. Lo vedremo muoversi con velocità costante in ogni punto del percorso: infatti dato che quest'ultimo si

trova a giacere in un piano, non vi sarebbe ragione alcuna perchè il moto variasse col variar dei punti.

Abbiamo visto dunque che ciascuno dei moti illustrati con fig. 13, 14 e 15 risultano dalla composizione di due moti periodici semplici di egual frequenza. Ci interessa particolarmente l'ultimo dei tre casi esposti giacchè è valso a mostrarci che un moto circolare, a velocità costante, risulta dalla composizione di due moti periodici semplici, in direzioni reciprocamente perpendicolari. Per essere più precisi,

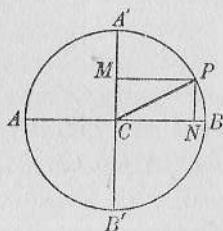



Fig. 16. - Moto periodico semplice, espresso geometricamente. Mentre *P* descrive un cerchio, *N* si sposta, avanti e indietro, lungo il diametro *AB*, anch'esso con moto periodico semplice.

immaginiamo che il punto *P* in fig. 16 si muova attorno al cerchio *AA' BB'* con velocità costante, come la lancetta di un orologio. Dal punto *P* (ovunque esso sia) caliamo le perpendicolari *PN, PM* e siano *N* ed *M,* rispettivamente, i loro punti d'incontro con i diametri *AB, A'B'*. Mentre *P* gira attorno al cerchio, *N* si sposterà, avanti e indietro, lungo *AB* e, dal suo canto, *M* farà altrettanto lungo *A'B'*. Sappiamo già che il moto di ciascuno di questi punti è un moto periodico semplice.

Ecco dunque l'espressione geometrica di un moto del genere: mentre *P* si muove lungo un cerchio, *N* compie un moto periodico semplice. Da questa

definizione risulta in modo chiaro che il moto di un pistone all'interno del cilindro di una locomotiva o di un motore a scoppio dev'essere un moto periodico semplice.

Lo comprenderemo meglio, forse, se guardiamo il problema sotto un altro punto di vista, e consideriamo che mentre il punto *N* si sposta, avanti e indietro lungo *AB,* il punto *P* gira attorno al cerchio *AA'BB'* (circolo polare). Il diametro *AB* viene detto « estensione » e il raggio *CA* (o *CB*) ampiezza del moto stesso.

ENERGIA

L'ampiezza di una vibrazione è indice dell'energia che la provoca e, in generale, si ha che l'energia di una vibrazione è proporzionale al quadrato dell'ampiezza. Così, ad esempio, una vibrazione di ampiezza doppia di un'altra è animata da una energia quadrupla della prima. In altre parole il mezzo che vibra è dotato di capacità a produrre lavoro in misura quattro volte maggiore e questa energia deve, in un modo o nell'altro, spenderla tutta prima di porsi in riposo. Di solito l'energia latente in uno strumento musicale si trasforma in vibrazioni dell'aria circostante; infatti, se noi udiamo il suono dello strumento, lo dobbiamo al fatto che questo versa, uniformemente, la propria energia nell'aria che lo circonda.

Possiamo dedurne che quando si voglia conservare inalterata l'intensità di una data vibrazione, occorre fornirle continuamente energia, come d'altronde si fa con l'organo o con la corda di un violino. Qualora invece ciò non avvenga la vibrazione svanirà, come avviene per le corde del pianoforte,

per le campane o i piatti. Scema in tal caso l'ampiezza della vibrazione e il circolo di riferimento si restringe per ridursi a un punto.

Allorchè un mezzo compie più vibrazioni contemporaneamente, di solito l'energia non vien propagata dall'una all'altra vibrazione. Le varie vibrazioni sono indipendenti l'una dall'altra, ognuna è dotata di una certa parte di energia che non si perde — salvo beninteso quel tanto che vien ceduto ad altri mezzi esterni — l'aria, per esempio. E perciò l'energia che da origine a un certo numero di vibrazioni simultanee, va considerata come *somma* delle singole vibrazioni.

SUONI SIMULTANEI

Allorchè un diapason vibra, ogni suo punto materiale è soggetto a un moto periodico semplice. I punti che ne formano la superficie trasmettono il loro movimento all'aria circostante e quindi, nelle immediate vicinanze del diapason, le varie particelle d'aria saranno soggette, esse pure, a un moto periodico semplice, di frequenza uguale a quello del diapason. Nè si modificherà la frequenza, allorchè la vibrazione verrà trasmessa all'orecchio di un ascoltatore. A ciò si deve se la nota udita da quest'ultimo ha la stessa altezza di quella emessa dal corista.

Le cose si complicano un po' quando i due diapason son posti l'uno a lato dell'altro. Ognuno di essi conferisce allora un moto periodico semplice a ciascuna particella di aria circostante, per modo che questa sarà sollecitata dal moto risultante dalla composizione dei due moti.

Sarà opportuno esaminare attentamente i moti di

questo genere data la grande importanza che essi hanno nei problemi musicali d'indole pratica. Cominceremo col caso più semplice di tutti — la composizione di due moti aventi la stessa frequenza. Il moto risultante è quello che assumerebbe una particella d'aria sollecitata dalle vibrazioni simultanee di due diapason, di egual nota musicale, posti l'uno a lato dell'altro.

COME SI COMPONGONO DUE VIBRAZIONI AVENTI LA STESSA FREQUENZA

I due moti periodici semplici siano rappresentati dalle due sinusoidi passanti per X e Y in fig. 17.

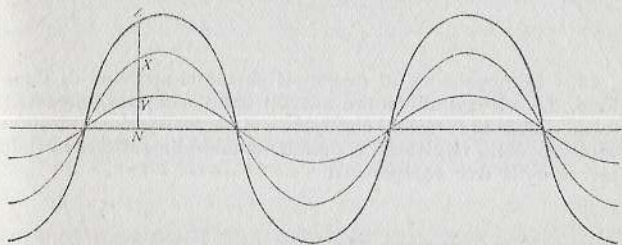



Fig. 17. - Composizione di due moti periodici semplici di ugual periodo. Le vibrazioni (curve sottili), in questo caso, sono « in fase » — massimo su massimo e minimo su minimo. Esse quindi si rinforzano e la loro risultante (curva più marcata) ha una ampiezza uguale alla somma delle ampiezze delle componenti

Le due curve son state disegnate in modo che le ampiezze delle loro rispettive onde stiano fra loro nel rapporto 5 a 2. Sarà perciò $YN = 2/5$ di XN e, naturalmente, l'eguaglianza vige lungo tutto il percorso. All'istante che, sull'asse delle X, corrisponde al punto N, la prima delle due vibrazioni ha provocato uno spostamento corrispondente al tratto XN, mentre la seconda ne ha provocato uno corrispon-

dente a YN ($YN = 2/5\ XN$). Perciò lo spostamento risultante sarà rappresentato dal tratto ZN in fig. 17 e, logicamente, $ZN = 1\ 2/5\ XN$.

La curva più marcata, passante per Z, è stata disegnata in modo che la distanza di ogni suo punto (sopra e sotto l'asse orizzontale) sia sempre esattamente una volta e 2/5 quella della curva passante per X. Questa curva sarà dunque la traccia del moto risultante che cercavamo. Essa, d'altronde, riproduce semplicemente la curva meno marcata, passante at-

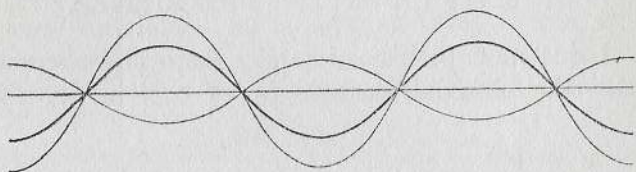



Fig. 18. - Composizione di due moti periodici semplici di ugual periodo. Le vibrazioni (curve sottili) sono « in fase opposta », agiscono quindi in direzioni contrarie e si neutralizzano a vicenda. L'ampiezza della risultante è quindi uguale alla differenza delle ampiezze delle due componenti.

traverso X ma ingrandita (per così dire) una volta e due quinti, in senso verticale: lungo l'asse orizzontale le dimensioni restano invariate.

L'esempio testè dato è solo un caso particolare del problema generale: le curve a traccia sottile in figura 17, hanno infatti una posizione speciale. I picchi delle prominenze delle due curve (in matematica si direbbe: i massimi) avvengono contemporaneamente e così pure le depressioni; nel diagramma vediamo infatti l'un picco giacer sull'altro e così pure le depressioni. Quando, per due vibrazioni, si verifica questo caso, si dice che le vibrazioni sono « in fase ».

In fig. 18 vediamo invece due curve in cui i massimi dell'una si verificano contemporaneamente ai

minimi dell'altra. Quando ciò avviene, diremo che le vibrazioni sono « in fase opposta ». I massimi vengono a trovarsi sui minimi e viceversa cosicchè i due moti componenti determinano spostamenti in senso opposto. La curva più marcata ci dà la traccia del moto risultante, la cui ampiezza, necessariamente, non sarà più rappresentata dalla somma, bensì dalla differenza delle rispettive ampiezze delle onde componenti. L'ampiezza d'onda della curva risultante non sarà più $1 + 2/5$ ma $1 — 2/5$. Non è detto

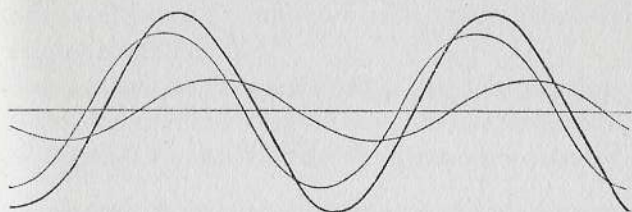



Fig. 19. - Composizione di due moti periodici semplici di ugual periodo. I periodi, in questo caso, sono « sfasati » l'uno rispetto all'altro. Il moto risultante è tuttora periodico semplice.

però che quando due moti avvengono contemporaneamente essi debbano, senz'altra alternativa, o essere in fase oppure in fase opposta. Casi talmente semplici occorrono di rado: è molto più facile che i massimi di una curva non si trovino nè sopra i massimi nè sopra i minimi dell'altra ma siano piuttosto in una posizione intermedia fra le due (fig. 19).

Sommando gli spostamenti illustrati nella figura annessa (curve sottili), valendoci del sistema ivi chiarito (prendendo cioè $ZN = XN + YN$, e così via), troveremo che il moto risultante è espresso dalla curva più marcata che vi compare. È sufficiente dare uno sguardo a questa curva per rilevare che essa è l'immagine di un moto periodico semplice. Tuttavia, per di-

mostrare l'asserto, dovremo impostare il problema nel modo seguente.

Abbiamo già visto come, dal moto di un punto che descrive un cerchio, si possa ricavare un qualunque moto periodico semplice. Così, per esempio, mentre il punto P percorre un cerchio (vedi fig. 16), il punto N si sposta, avanti e indietro, lungo la retta AB, soggetto a un moto periodico semplice.

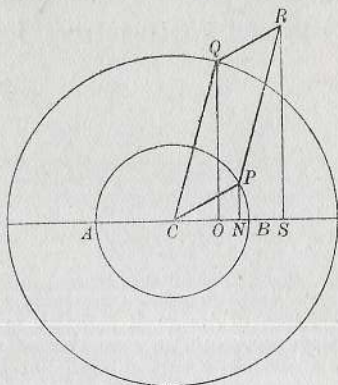



Fig. 20. - Composizione di due moti periodici semplici, geometricamente espressa. Mentre P e Q percorrono i rispettivi cerchi, N e O si muovono con moto periodico semplice. Il movimento risultante è espresso da S, giacchè $CO + CN = CS$.

Dovendo poi comporre due di codesti moti, potremo, semplicemente, considerare due punti, ciascuno dei quali si muove, con velocità uniforme, lungo un proprio cerchio, di dato raggio. Siano quindi P e Q i due punti in esame (fig. 20) e siano N e O le loro proiezioni. Queste, come sappiamo, si muovono con moto periodico semplice.

All'istante considerato, il moto di P ha determinato lo spostamento corrispondente a CN, mentre quello di Q ha prodotto quello corrispondente a

CO. Lo spostamento complessivo, essendo la somma dei due, è uguale a $CO+CN$.

Perchè ciò risulti, in fig. 20, conduciamo da Q la parallela al tratto CP e prendiamo QR eguale a CP. La Geometria insegna che il tratto OS, proiezione di QR è uguale a CN, proiezione di CP. E perciò la somma $CO+CN$ sarà uguale a $CO+OS$, cioè a CS. Concludendo: mentre P e Q si muovono attorno ai loro rispettivi cerchi, le loro proiezioni N e O compiono i due moti periodici semplici componenti e il punto S compie il moto risultante dalla sovrapposizione dei due.

Sino ad ora abbiamo supposto che i moti compiuti dai punti N ed O abbiano la stessa frequenza e che, perciò, i raggi CP e CQ si muovano con la stessa velocità. L'angolo $\widehat{PCQ}$ resterà quindi immutato. Possiamo d'altronde farci un'idea più chiara del moto complessivo supponendo di ritagliare, in un cartoncino, il parallelogrammo $CPRQ$ e di farlo ruotare attorno al centro C, alla stessa velocità di P e di Q. Vedremo quindi che R descriverà un cerchio, con velocità costante, e quindi il punto S si sposterà lungo AB con moto periodico semplice. Abbiamo così dimostrato, che quando due moti del genere hanno la stessa frequenza, componendoli, il moto risultante sarà pure periodico semplice della medesima frequenza dei due componenti. Portandoci adesso nel campo musicale, diremo che l'emissione contemporanea di due note pure, che abbiano la stessa frequenza, genera una nota pura di altezza uguale a quella delle due componenti.

Un altro lato interessante del caso precedentemente trattato è l'intensità del suono che si ottiene. La vibrazione risultante ha un'ampiezza rappresentata, graficamente, dalla lunghezza della diagonale *CR* la quale a sua volta dipende non solo dall'estensione dei tratti *CP*, *CQ*, corrispondenti alle vibrazioni componenti, ma anche dall'angolo compreso fra *CP* e *CQ*. Quando infatti l'angolo è di pochi gradi, la *CR* è più estesa; lo è meno se l'angolo è di maggiore apertura. Abbiamo già notato che l'energia che anima il suono è proporzionale al quadrato di *CR*, cosicchè il suono sarà molto intenso quando *CR* sarà molto estesa e ciò avviene quando *CP* e *CQ* si trovano nella stessa direzione. Infatti, in questo caso, il parallelogrammo si riduce ad una retta e la ampiezza *CR* della nuova vibrazione è rappresentata dalla somma delle ampiezze *CP* e *CQ* delle vibrazioni componenti. È questo il caso illustrato in figura 17: le vibrazioni essendo in fase, si rinforzano reciprocamente e al massimo grado.

Per contro il suono sarà minimo allorchè *CR* assumerà il valore minimo. Ciò avviene quando *CP* e *CQ* giacciono in direzioni opposte. In tal caso infatti l'ampiezza *CR* diviene la differenza fra *CQ* e *CP* (1). Questo è il caso (illustrato in fig. 18) di vibrazioni in fase opposta; esse agiscono in senso contrario e quindi tendono ad annullarsi reciprocamente. L'angolo $\widehat{PCQ}$ è uguale a zero quando le vibrazioni sono in fase ed è uguale a 180 (angolo piatto) quando sono in fase opposta. Di solito però l'an-

(1) Essa va a giacere anche in questo caso sulla retta *PQ* nella quale si è ridotto il parallelogramma. - N. d. T.

golo $\widehat{PCQ}$ ha un valore intermedio fra i due e in tal caso le vibrazioni hanno una differenza di fase uguale a $\widehat{PCQ}$. Quando ciò si verifica si suol dire anche che Q è spostato da PCQ, rispetto a P. La fig. 19 ci dà una rappresentazione grafica del fenomeno.

INTERFERENZA

Da quanto precede, abbiamo visto che, quando due note hanno la stessa intensità e sono in fase, la risultante avendo ampiezza doppia di ciascuna di esse, possiede altresì un'energia quadrupla della loro. Ciò significa che una nota, allorchè vibra contemporaneamente a un'altra, è dotata di un'energia doppia di quando vibra da sola. Verrebbe, quindi, fatto di pensare che suddividendo l'elemento che vibra in varie parti se ne trarrebbe un vantaggio nei riguardi della potenza del suono. Per esempio: usare due canne d'organo di uguale altezza, anche se deboli, anzichè una sola e di potenza doppia di ciascuna delle prime. E pure così non è: la natura non dà mai qualcosa per nulla, per quanto a volte sembri che essa esiga qualcosa senza averci dato alcunchè.

In pratica, se noi poniamo due canne d'organo l'una accanto all'altra, sulla stessa camera del vento e le facciamo suonare assieme, non udremo davvero un suono quattro volte più intenso di quello che emetterebbe una canna sola; udremo tutt'al più un soffio prolungato. Se giungeremo ad udire una nota, questa sarà debolissima. Osserviamo tuttavia che ponendo una penna vicina al bordo dell'una o dell'altra canna, il soffio l'agiterà con altrettanta vivacità di quando la canna suona isolatamente, emettendo la

nota che le è propria. Ponendo l'estremo di un tubo di gomma in prossimità del labbro prima dell'una e poi dell'altra canna, e applicando l'altro estremo al nostro orecchio, constateremo che ciascuna canna emette la nota che le è propria.

Ecco come si spiega questo apparente paradosso: appena la prima canna inizia la serie delle vibrazioni, l'efflusso che esce dall'imboccatura, crea un aumento di pressione, per via del quale l'aria ambiente tende a penetrare nell'apertura dell'altra canna e viceversa. È quindi l'aria che si effonde dall'una canna penetra nell'altra. Perciò avviene che, ad ogni soffio, le loro vibrazioni siano in fase opposta; in tal caso la loro risultante non è più uguale alla somma, bensì alla loro differenza, vale a dire, è uguale a zero. Si dice, in questo caso, che le due canne « si dànno, reciprocamente, sulla voce ». In pratica, il costruttore d'organi cercherà di porre le due canne simili l'una distante dall'altra più che sia possibile, allo scopo di ridurre al minimo la loro interferenza.

I due rebbi di un corista determinano, a un dipresso, lo stesso fenomeno. Considerandoli alla stregua di due mezzi capaci di emettere vibrazioni, ciascuno per proprio conto, si comprende facilmente come le loro vibrazioni tendano a porsi in fasi opposte e perciò a neutralizzarsi. Perciò quando da un corista si voglia trarre un suono più intenso, si dovrà interporre uno schermo di cartoncino fra i due bracci dello strumento, impedendo così che le vibrazioni di un suo rebbio pervengano all'altro e viceversa.

A prima vista potrebbe sembrare paradossale che due suoni possano reciprocamente annullarsi al modo che abbiam esposto. Il suono, infatti, ci appare

come la causa determinante di una sensazione e perciò, logicamente, se un suono è atto a produrre *una* sensazione, *due* suoni ci dovrebbero far percepire *due* sensazioni. Ciò, d'altronde, sarebbe vero se i suoni giungessero a tanto da produrre la sensazione. In pratica, invece, essi, prima ancora di giungere ai nostri orecchi, si annullano a vicenda. Così, abbiamo visto che una canna d'organo, invece di produrre quelle onde sonore che, attraverso all'aria ambiente, ci giungono all'orecchio, si limita a dar luogo alle vibrazioni che vengon poi assorbite dall'altra canna e viceversa. I nervi dell'udito non percepiscon, quindi, suono alcuno. Analogo è il caso di due corde, poste l'una accanto all'altra e tese in modo da emettere la stessa nota. Perciò, nel pianoforte, vediamo tre corde anzichè due, in corrispondenza a ciascun tasto.

BATTIMENTI

Esaminiamo, adesso, il caso di due diapason le cui note, anzichè essere rigorosamente uguali, presentino una lieve differenza nelle rispettive altezze. La diversità è dovuta al fatto che le due oscillazioni, che poi si comporranno, sono di frequenza lievemente diversa. Se ci riferiamo alla fig. 20, potremo immaginare che P e Q percorrano i rispettivi cerchi a velocità leggermente differenti. Tanto per fissar le idee supponiamo che P compia 250 giri al secondo e Q, invece, 252. Il punto Q compie due giri al secondo più di P e, quindi, ha un certo vantaggio su P. Così come avviene per le lancette dell'orologio: quella più lunga, dei minuti, gira più velocemente di quella delle ore. Per tale motivo, l'angolo PCQ varia continuamente e il parallelogrammo $CPRQ$

non resterà immutato, ruotando attorno al centro C. Nella posizione che occupa in fig. 20, esso sta per « chiudersi », dimodochè CP e CQ verranno a coincidere ed avranno la stessa direzione. Quando ciò avvenga, le due vibrazioni sono in fase e l'ampiezza della risultante sarà $CQ + CP$. Ma di lì a poco l'angolo si aprirà nuovamente sinchè, un quarto di secondo dopo, CP e CQ assumeranno direzione opposta. Le due vibrazioni sono adesso in fasi opposte e l'ampiezza della risultante sarà $CQ—CP$.

Non appena sia trascorso un successivo quarto di secondo, le vibrazioni essendo nuovamente in fase, la loro risultante avrà nuovamente, un'ampiezza somma: $CQ + CP$. Vediamo quindi che la risultante oscilla sempre fra i limiti: $CQ + CP$ e $CQ - CP$.

Se i tratti corrispondenti agli spostamenti CQ e CP sono uguali, l'ampiezza della risultante si annulla e scompare negli istanti in cui le componenti sono in opposta fase, cosicchè il suono che noi percepiremo consisterà in una serie di impulsi sonori, alternati a istanti di completo silenzio e ciò ogni mezzo secondo.

Se invece le ampiezze CP e CQ non sono rigorosamente uguali, l'ampiezza del suono risultante varierà continuamente. È vero che un certo suono lo udremo costantemente, ma l'intensità di esso, andrà aumentando per poi scemare, cosicchè il suono avrà un carattere ondulatorio.

Vengon denominati « battimenti » gli istanti nei quali il suono raggiunge l'intensità massima e, talvolta, gli intervalli fra un minimo e l'altro.

Nel caso particolare, ora considerato, avremo due battimenti al secondo, dato che la differenza fra 522 e 520 è appunto due. Qualora invece fra le due note considerate vi fosse stata una differenza di frequen-

za pari al doppio della precedente, avremmo udito quattro battimenti al secondo e così via. Maggiore è la differenza di frequenza fra le due note e tanto più frequenti saranno i battimenti. Quando un accordatore fa sì che le due corde di un piano o le due canne di un organo abbiano la stessa altezza, egli dovrà adoprarsi a che non siano più uditi battimenti. Tuttavia, anche se le circostanze sono molto favorevoli, si udrà sempre almeno un battimento ogni mezzo minuto.

Quando i battimenti non sono più di 2 o 4 al secondo, il suono non riesce sgradevole all'orecchio. Certi registri dell'organo (ad esempio la « vox celestis e l'unda maris ») sono intesi a provocare deliberatamente il fenomeno acustico suddetto, e ciò si ottiene disponendo due canne per ciascuna nota e facendo sì che fra i due suoni interceda quella diversità di frequenza che provoca, appunto, due o tre battimenti al secondo. La « voce celeste » di solito vien prodotta mediante canne che dànno il suono di corde. Malgrado il nome un po' fantastico, la vox celestis vuole imitare quel suono lievemente ondulato che si ode quando gli strumenti ad arco, in un'orchestra, suonano all'unissono. Quel suono al quale alludiamo sorge, in parte, dai battimenti che quasi sempre avvengono, dato che i vari strumenti non possono essere perfettamente d'accordo l'uno con l'altro, ma, oltre a ciò, vi è pure un'altra causa, piuttosto delicata, che porremo in evidenza allorchè ci occuperemo dei suoni emessi dagli strumenti ad arco.

Il registro « unda maris » poi, dal nome ancor più fantastico, è dato da canne a suono di flauto e fa pensare a voci che tentino di cantare all'unissono, pur non riuscendovi. Sono appunto queste alterna-

tive, nell'altezza dei suoni, che dànno all'organo quell'espressione vivace e movimentata che altrimenti non possiederebbe.

Gran parte degli ascoltatori gradisce il suono di questi registri, specialmente per gli acuti: i registri suddetti non si estendono sotto al DO (ott. picc.) voce tenore, giacchè i battimenti, nei suoni gravi son meno piacevoli.

Come regola generale i battimenti non sono più accetti all'orecchio, quando il loro numero, al secondo, è della stessa grandezza della frequenza della nota fondamentale. Per esempio: una canna d'organo lunga circa metri 4,60 (DO controttava) emette 33 vibrazioni al secondo, mentre la canna del DO♯ che le è vicina ne produce 35. Ora, traendo il registro corrispondente alla canna di m. 4,60 e suonando contemporaneamente i due ultimi tasti, udremo due battimenti al secondo con effetto assai sgradevole. Suonando assieme il DO e il RE (controttava) udremo 4 battimenti al secondo e l'effetto sarà anche peggiore.

Vediamo adesso questo fenomeno più estesamente. Prendiamo, a tale scopo, un diapason di frequenza 261 (DO ott. centr.) e facciamolo vibrare, successivamente, con vari altri diapason di frequenza ascendente (uno per volta). La serie delle frequenze sia: 262 - 264 - 266 - 268 - 270. Col primo diapason avremo un solo battimento al secondo e l'effetto è gradevole, per quanto possa spiacere un po' la lentezza con la quale i battimenti si producono. Col secondo diapason, di frequenza 264, udremo tre battimenti al secondo, e l'effetto è tuttora piacevole. Il diapason seguente (266) provocherà 5 battimenti al secondo e, questa volta, il risultato, acusticamente,

è poco piacevole; i battimenti si ripetono troppo sovente. Tale impressione, sgradita all'orecchio, va aumentando sinchè giungiamo al diapason di frequenza 284 che provoca 23 battimenti al secondo. Distinguiamo tuttora i battimenti ma l'effetto che ne deriva è ormai sgradevolissimo; non è più una nota musicale quella che udiamo: è una rapida sequenza di suoni, aspri ed irritanti. Dopo di ciò i battimenti sono tuttora percettibili per qualche po', ma la spiacevolezza loro va diminuendo. Allorchè giungiamo al diapason 320 (o giù di lì) i battimenti singoli non sono più identificabili, ma, in complesso, il suono è tuttora sgradevole. Prolungando l'esperimento, i battimenti non si manifesteranno ormai più e ciò indipendentemente dall'altezza alla quale portiamo il secondo diapason. Nei capitoli che seguono, vedremo di comprenderne il perchè; frattanto abbiamo riportato nella tabella seguente, i risultati degli esperimenti praticati da Mayer e Stumpf, intesi ad accertare il massimo numero di battimenti che è dato di avvertire con suoni fondamentali di

Frequenza del diapason N. 1	Numero dei battimenti (per secondo) allorchè		Intervallo (in semitoni) sinchè i battimenti scompaiono
	la sensazione da essi generata era sgradevole al massimo	non era più dato avvertirli	
96	16	41	6
256	23	58	4
575	43	107	3
1707	84	210	2
2800	106	265	1,5
4000	—	400 (*)	1,6

(*) Questo è il numero dato da Stupf; Helmoltz aveva, precedentemente, trovato un limite di soli 276 battimenti, o semitoni 1,1.

differenti altezze. Nel corso di questi esperimenti il diapason numero 1 vibrava senza interruzione, e, nel frattempo, veniva aumentata, gradualmente, la frequenza del diapason n. 2. Gli esperimenti erano intesi ad accertare:

a) il numero dei battimenti, allorchè il senso di spiacevole udire è più intenso;

b) il numero massimo di battimenti percettibile o anche l'istante al di là del quale non è più possibile avvertirli.

Gli studiosi sono d'avviso che la sensazione sgradevole sorga, in parte, dall'irritazione mentale che si prova volendo tener dietro a una serie di brusche variazioni, e, in parte dall'irritazione, questa volta fisica, prodotta da una serie di stimoli che si alternano rapidamente. Si tratta di una sensazione analoga a quella che prova la vista, al cinematografo, assistendo alle proiezioni di un film oscillante e abbagliante (1). Se le varie immagini si seguono alla velocità di una al secondo, non si percepisce irritazione di sorta giacchè, in tal caso, la vista ha tutto il tempo di percepire tranquillamente ogni immagine, prima che si presenti la successiva. Quando invece si presentino all'occhio dieci immagini contemporaneamente, occorre uno sforzo per seguirle e ciò può dare il mal di capo. Quando poi, aumentando la velocità, le immagini divengono 20 al secondo, l'occhio scorge soltanto un flusso luminoso e uniforme, che non stanca più la vista, non dovendo questa, per seguirlo, compiere alcuno sforzo.

(1) Il così detto «sfarfallio».

NOTE RISULTANTI: NOTE-DIFFERENZA E NOTE-SOMMA

Esaminiamo, finalmente, cosa avviene quando si sovrappongano due note dissonanti; per esempio due vibrazioni armoniche di frequenze molto dissimili fra loro. Per fissar le idee supporremo che queste ultime siano l'una 600 e l'altra 800. Riferendoci alla fig. 20, potremo quindi supporre che, inizialmente, le direzioni di CP e CQ coincidano e che P e Q ruotino, compiendo 600 e 800 cicli al secondo rispettivamente. Perciò il punto Q raggiunge e sorpassa P duecento volte al secondo. Ogni volta che ciò avviene si riproducono le condizioni iniziali, cosicchè il moto si ripete duecento volte al secondo, dando luogo a una periodicità regolare di frequenza 200. Se tale valore fosse stato minore, la periodicità si sarebbe resa udibile sotto forma di battimenti. Per quanto non sia percettibile all'udito, perchè troppo alta, la periodicità sussiste matematicamente e, in determinate circostanze (che in seguito vedremo) può anche divenire udibile, come nota risultante. S'intende con ciò una nota, la cui frequenza è data dalla differenza delle frequenze delle note componenti. Potrebbe, impropriamente, chiamarsi: nota-differenza.

Per quanto riguarda la fedele riproduzione di un moto periodico semplice è del tutto indifferente che il punto dato si muova in un senso o nell'altro. Così possiamo benissimo rappresentare i due moti da comporre supponendo che, in fig. 20, P e Q ruotino in sensi opposti. In tal caso, date le frequenze che abbiamo supposto, i due punti si incontreranno nei loro giri 1400 volte al secondo. Vediamo così che il moto risultante dalle frequenze 600 e 800, ha in se

latente un'altra periodicità di frequenza 1400. In determinate circostanze, anche questa può divenire udibile. Impropriamente potrebbe chiamarsi « nota-somma ».

Dobbiamo tuttavia aggiungere che la spiegazione delle note risultanti che abbiamo dato è incompleta e ben poco rigorosa. Abbiamo trattato sommariamente tale questione perchè il lettore abbia una prima idea di questo importante problema che tratteremo in seguito, più diffusamente.

VIBRAZIONI FORZATE

Vediamo ora un esperimento di altra indole. Prendiamo, a tale scopo, un diapason di frequenza 261 ed applichiamo saldamente, fra i suoi rebbi, un elettromagnete simile a quello che abbiamo già impiegato nel nostro microfono (fig. 21). La corrente che ne percorre gli avvolgimenti sia alternata. Ogni variazione della corrente, provoca una variazione nella magnetizzazione del nucleo di ferro dolce e questa, a sua volta, determina un mutamento nell'azione esercitata sui rebbi del diapason. La corrente, perciò, esercita un'ulteriore azione, che si aggiunge alle vibrazioni proprie del diapason, allo stesso modo che si aggiungeva all'attrazione, già esercitata sul diaframma del microfono.

Soffregando il diapason con l'archetto di un violino, udremo la nota DO (ott. centr.) corrispondente a 261 vibrazioni al secondo. Ora, nel corso della vibrazione suddetta, facciamo passare, nell'avvolgimento del magnete, una corrente alternata di frequenza diversa da quella del diapason, per esempio 293 cicli al secondo. Udremo, in un primo tempo, una dissonanza; poi, di lì a poco, il diapason emet-

terà nuovamente una nota pura. E questa, anzichè il DO (ott. centr.) sarà il RE (ott. centr.) che ha appunto la frequenza 293.

Si comprende facilmente cos'è avvenuto: la corrente (o più precisamente, il magnetismo da essa suscitato nel nucleo) si è fatta sentire sui rebbi del diapason e l'ha, per così dire, costretto a effettuare 293 vibrazioni al secondo. Dapprima questa vibrazione

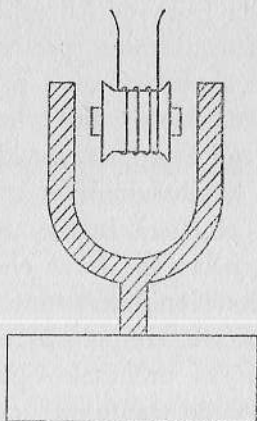



Fig. 21. - Diapason azionato a elettricità. I rebbi, sollecitati da un elettro-magnete, vibrano, senza interruzione, sinchè passa la corrente.

si è sommata (algebricamente) a quella propria del diapason ed ha prodotto, in conseguenza, 32 battimenti al secondo; numero, questo, corrispondente a una sensazione sgradevole. Dato che non vi è presente alcuna forza che possa mantenere in efficienza la vibrazione propria del diapason, questa, di lì a un po', cesserà. D'altra parte, la corrente, ponendo in azione il magnete, fornisce, continuamente, energia alla vibrazione di frequenza 293, cosicchè è quest'ultima che finisce per prevalere e restare in azio-

ne. Quindi, di lì a poco, il diapason, per quanto sia foggiato in modo da emettere il DO (ott. centr.) emetterà invece il RE (ott. centr.). Una vibrazione di tal genere vien chiamata, impropriamente, « vibrazione forzata », mentre quella che il diapason produce quando emetta, da solo, la nota che gli è propria, si chiama « vibrazione libera ».

I nostri esperimenti hanno illustrato un principio generale della fisica: « Allorchè un mezzo capace di vibrare (un diapason, per esempio) vien posto in vibrazione da una forza a periodo regolare e di data frequenza, può, in un primo tempo, emettere la nota che gli è propria, ma di lì a breve, venendo a cessare le vibrazioni che tale nota determina, il diapason emetterà invece una nota di frequenza pari a quella della forza che su di esso agisce. Quindi le vibrazioni libere sono transitorie, quelle forzate hanno carattere permanente ».

Il principio trova numerose applicazioni: i nostri apparecchi radio, tanto per citarne una, hanno gran numero di vibrazioni libere e, percuotendone i vari punti con un martelletto, potremo porle in azione. Pure, quando facciamo passare la solita corrente, poniamo a 50 cicli al secondo, per alimentare l'apparecchio, udiamo soltanto un ronzio di altezza costante, la cui frequenza corrisponde appunto a 50. Del pari il diaframma di quel microfono che abbiamo visto nel nostro primo esperimento, possiede anch'esso la propria vibrazione libera eppure emette solo quella nota o quel suono che la corrente nell'avvolgimento del nucleo gli fa emettere.

Possiamo anche allargar la portata del nostro espe-

rimento. Supponiamo di poter variare a piacere la frequenza della nostra corrente. Sino ad ora essa compiva 293 cicli al secondo; riduciamo adesso gradualmente questo valore. Man mano che la frequenza scema, anche l'altezza della nota cala e passa dal RE (ott. centr.) pel DO♯, DO, SI, SI♭, e così via. Il solo fatto che la nota cali può apparire di scarsa importanza mentre invece è molto significativo il fatto seguente: man mano che l'acutezza del suono scema, la nota si fa sempre più intensa, sinchè, quando giunge al DO, l'acutezza della vibrazione libera del diapason ha assunto una particolare intensità. Non appena oltrepassato il DO, essa si smorza, per spengersi del tutto di lì a poco.

RISONANZA

Quest'ultimo esperimento ci porge un esempio di quella legge fisica, nota col nome di « Principio della Risonanza », che può essere espressa come segue: « L'ampiezza di una vibrazione forzata va gradatamente aumentando, man mano che la frequenza si avvicina a quella della vibrazione libera del mezzo considerato, per diventar massima quando le due frequenze coincidono.

Comprenderemo meglio il significato di questo principio considerando un caso semplice al quale esso si applica: il fatto di suonare una pesante campana.

Una grossa campana è, spesso, così pesante che il campanaro non perverrebbe a trarne il suono dando un solo strappo alla fune. Egli, perciò, si limi-

terà a porre tutta la forza che può nella prima stratta per poi abbandonare la fune. La campana comincierà allora ad oscillare (come un pendolo), compiendo un moto periodico semplice, e la corda muovendosi verso l'alto e il basso, ne seguirà il movimento. Allorchè la campana ha compiuto una oscillazione completa, la fune è tornata alla sua posizione originale e adesso cala. Di ciò approfitta il campanaro per darle un'altra stratta e così facendo aggiunge al primo un secondo moto periodico semplice, entrambi in fase. La campana oscillerà ora con maggior forza. Il campanaro non ha che da ripetere il gesto più e più volte di seguito. Così facendo egli applica alla campana una forza periodica, di frequenza uguale a quella della sua oscillazione libera. Si vengono così sovrapponendo nuove oscillazioni che sono tutte in fase con la prima (e quindi ne accrescono l'ampiezza), e ciò sinchè la campana suoni con la forza che il campanaro desidera. Si avrebbe lo stesso risultato se il campanaro desse una stratta alla fune durante un qualsiasi istante del suo moto calante. Se invece tirasse la fune mentre questa sta risalendo, egli aggiungerebbe un'oscillazione in fase tale da diminuire l'ampiezza di quella originale e, se seguitasse a far così, finirebbe per fermare del tutto fune e campana.

Il rollio di una nave, in mare mosso, ci dà un secondo esempio di risonanza. Ogni onda che urta contro i fianchi della nave determina un moto di rollio: se le onde si seguono con molta regolarità possono provocare un movimento di considerevole ampiezza. Questo avrà la stessa frequenza del moto ondoso e se, per caso, questa frequenza coincide con quella che è propria al rollio della nave, la situazione può divenire particolarmente grave.

Anche i ponti sospesi ci porgono un altro esempio di risonanza. Infatti un ponte sospeso è capace di oscillare, dall'alto al basso e viceversa, come un pendolo, così da formare un mezzo vibrante. Può darsi altresì che la frequenza delle sue vibrazioni libere si avvicini, numericamente, a quella del passo di un uomo. Perciò colui che attraversa il ponte, con passo fermo e deciso, potrà provocare vibrazioni forzate di grande ampiezza, e un gruppo di persone che vadano a passo (come i soldati, per esempio) sarà causa di una serie di oscillazioni talmente violente da porre a repentaglio la sicurezza stessa del ponte. Dato che le statistiche registrano casi di sciagure avvenute in modo simile, si da ordine, di solito, alle truppe di procedere in ordine sparso al passaggio di un ponte.

Anche un bicchiere possiede un numero proprio ben definito di vibrazioni, che ne costituiscono la frequenza; tanto è vero che facendo scorrere la punta di un dito, inumidita, sul bordo, udremo una nota ben chiara e ne potremo anche variare l'acutezza, versando più o meno acqua entro il bicchiere. Ma anche indipendentemente dal soffregamento sopraddetto, una persona posta in prossimità del bicchiere, potrà provocarne la vibrazione, cantando quella nota che gli è propria, e più la nota cantata si avvicina come frequenza, alla nota propria del bicchiere, tanto più intensa sarà la vibrazione risultante. Tanto è vero che, in determinate circostanze, colui che canta può determinare addirittura la rottura del vetro.

Altrettanto può avvenire — più spiacevolmente — quando uno strumento musicale fa vibrare, in un dato ambiente, certi mobili, qualche ninnolo o il vetro di una finestra. Basta, a volte, la nota di un pianoforte, per determinare echi improvvisi e molesti nell'ambiente stesso e, di solito, il fenomeno è dovuto alla

risonanza di un oggetto la cui vibrazione libera ha la stessa frequenza della nota suddetta.

Un ultimo esempio ci viene fornito dal diaframma di un altoparlante. Questi è dotato naturalmente di una vibrazione libera di data frequenza e perciò occorre aver cura che quest'ultima non coincida con la frequenza di una delle note del brano che vien trasmesso, altrimenti quella data nota avrà una intensità eccessiva e di spiacevole effetto (il che, purtroppo, avviene spesso...). Altrettanto si può dire del ricevitore telefonico. In entrambi i casi vengono prese, normalmente, da parte delle autorità da cui ciò dipende, le misure del caso perchè certe note non vengano eccessivamente rinforzate dal fenomeno di risonanza.

Dagli esempi che abbiamo addotto, si potrebbe dedurre che il principio della risonanza altro non arrechi che molestia — e di fatto ciò avviene spesso — tuttavia il principio è sovente di grande ausilio nella risoluzione di certi problemi scientifici. Soffiando in direzione perpendicolare all'apertura di una chiave o di un tubo metallico, udremo una nota musicale, chiara e ben distinta; nota, la cui acutezza, ci rivela la frequenza delle vibrazioni dell'aria all'interno del tubo. Perciò la nota musicale della stessa frequenza porrà l'aria, entro al tubo, in vibrazione, per risonanza. Il fisico Helmoltz impiegava una serie di corpi cavi di vetro (risuonatori) di tali dimensioni e forma, che la vibrazione libera propria a ciascuno di essi coincidesse con una nota deteminata della scala musicale. Ognuno di questi « risuonatori » è dotato di un beccuccio che vien posto all'orecchio onde accertare se l'aria all'interno è, o no, in vibrazione. Così facendo si riesce a identificare l'altezza di una nota, determinando quello, fra i vari risuonatori, che si è posto a

vibrare, appunto per risonanza. Questi strumenti vengono chiamati « risuonatori di Helmoltz ».

Anche le corde di un piano possono venire impiegate allo stesso scopo. Premendo il pedale del forte si sollevano gli « smorzatori » e ogni corda diviene perciò un risonatore. Essa verrà posta in vibrazione non appena risuoni quella data nota, la cui frequenza sia uguale — o molto vicina — alla propria. Più si avvicinano le frequenze, più forte sarà la vibrazione risultante. Si può anche render visibile il fenomeno, ponendo dei piccoli « cavalieri » (in truciolo di legno, ad esempio) sulle corde. Non appena una corda sia posta in vibrazione per risonanza, il cavaliere saltellerà su di essa e basta un'impulso anche lieve per farlo cadere di arcione. Si possono anche porre delle piccole sbarrette leggere, pure in legno, in direzione perpendicolare a quella delle corde. Basta che le tre corde vibrino, anche leggermente, per far volgere la sbarretta, che poi finirà col cadere fra loro. Le varie note che concorrono alla produzione di un suono possono facilmente essere identificate, ponendo queste sbarrette su tutti i terni di corde e rilevando poi quelle che son cadute.

ANALISI DEI SUONI

Sono stati, di recente, ideati strumenti particolari, atti ad analizzare i suoni complessi; strumenti molto più sensibili e selettivi di quelli troppo elementari, che abbiamo or ora segnalato.

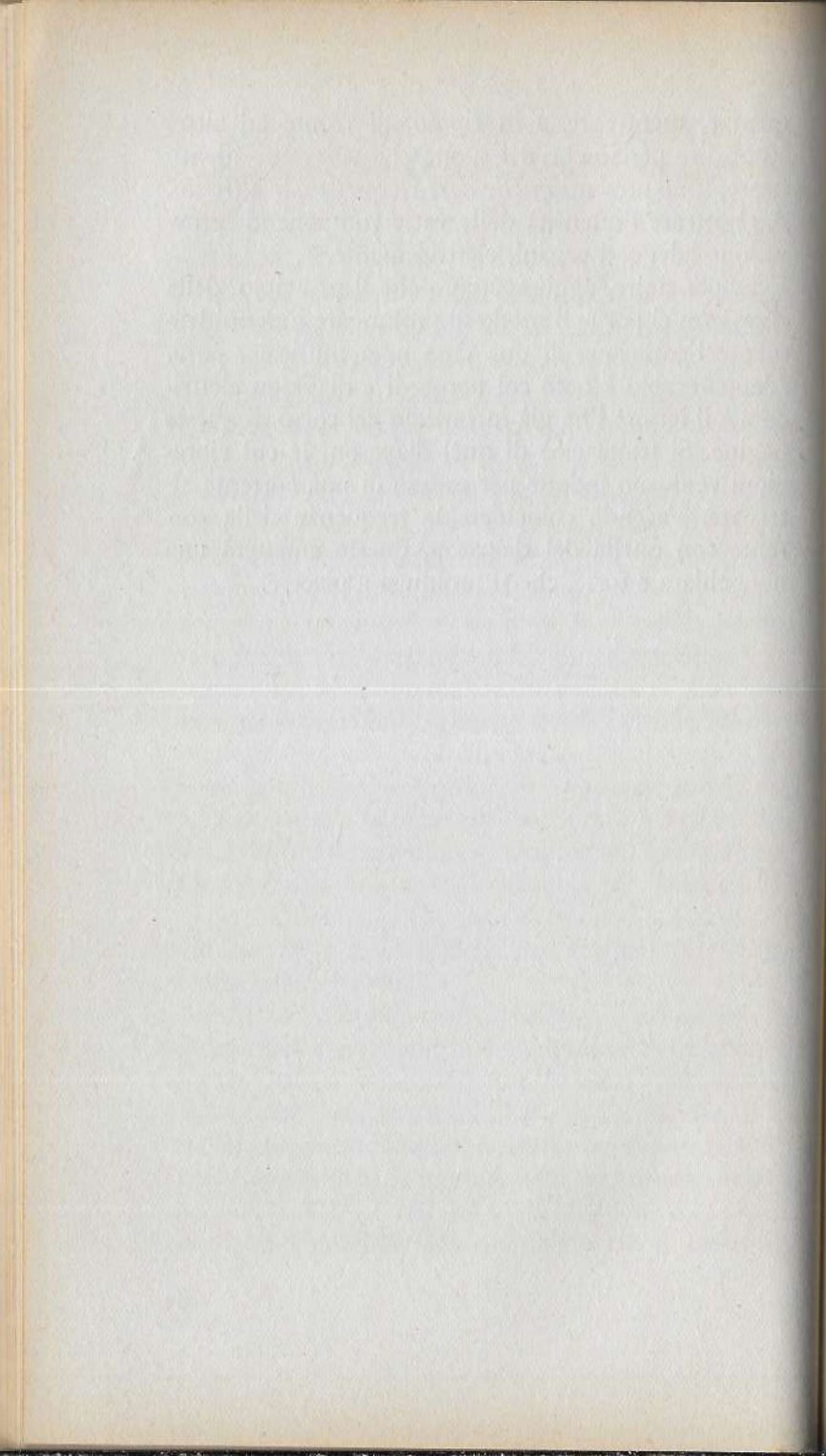
Per ben comprendere il funzionamento di questi strumenti potremo valerci dell'analogia che essi presentano con un comune apparecchio radio. Se questo è acceso, girando la sintonia e percorrendo così le varie lunghezze di onda, udremo intervalli di suono alter-

nati a zone di silenzio. Potremo, ad esempio, udire un suono intenso, quando la sintonia viene a trovarsi sulla lunghezza d'onda 1500 (200 kilocicli) oppure 342,1 (877 kilocicli); poi suoni più deboli in corrispondenza ad altre lunghezze d'onda e così via.

Ecco la ragione di tale fatto. L'apparecchio contiene un circuito oscillante, le cui vibrazioni libere non hanno una frequenza costante, bensì variabile in corrispondenza ai valori che la sintonia va assumendo. Quando quest'ultima si trova sulla graduazione corrispondente a 1500 metri (o 200 kilocicli), il circuito oscillante avrà una frequenza di 200.000 cicli al secondo e perciò si porrà in risonanza con una eventuale onda elettromagnetica di uguale frequenza che colpisca l'antenna dell'apparecchio. In virtù di tale risonanza, i suoni indotti dalle onde di quella particolare frequenza, verranno uditi con la massima chiarezza e intensità. Invece i suoni indotti da altre onde non saranno udibili, giacchè queste ultime, non essendo in risonanza col circuito oscillante, non vi destano oscillazioni percettibili; verrà anche la loro volta, ma, perciò, occorre che la sintonia volga su altri valori di lunghezza d'onda. Usato in tal modo, l'apparecchio radio può servir benissimo per l'analisi delle onde elettromagnetiche che colpiscono l'antenna, selezionandole, a seconda della loro frequenza, e segnalandocene la potenza.

Allo stesso modo, quell'apparecchio del quale oggi gli studiosi si valgono come « selezionatore di suoni », è provvisto di un risuonatore acustico di frequenza opportunamente variabile. Durante l'emissione di un suono complesso, facendo scorrere un suo organo apposito lungo tutta la gamma delle frequenze, osserveremo che l'aria, all'interno dell'apparecchio, viene posta in vibrazione in corrispondenza a certe fre-

quenze, mentre resta in riposo, di fronte ad altre. Vuol dire perciò che nel suono che volevamo identificare, sono presenti *quelle date* frequenze, le altre no. A registrare l'intensità delle varie componenti, provvedono adeguati organi, elettricamente.

E, per finire, aggiungeremo che il principio della risonanza ci porge il modo di prolungare indefinitivamente l'emissione di una data nota musicale, pura. L'apparecchio è noto col nome di « diapason elettrico » e il lettore l'ha già incontrato nel corso di queste pagine. Si tratta cioè di quel diapason, le cui vibrazioni venivano indotte per mezzo di una corrente alternata. Facendo coincidere la frequenza della corrente con quella del diapason, questo emetterà una nota chiara e forte, che si prolunga a piacere.

CAPITOLO TERZO

CORDE IN VIBRAZIONE E NOTE ARMONICHE

Abbiamo iniziato lo studio delle cosidette « curve del suono », prendendo in considerazione il diagramma tracciato da un diapason. Abbiamo scelto questo strumento perchè emette una nota quasi assolutamente pura. Aggiungiamo d'altronde (fatto questo noto a tutti i cultori di musica) che il suono di un diapason è bensì puro ma è anche monotono e perciò non arreca diletto alcuno all'udito. Forse a causa della sua purezza.

Un occhio artisticamente educato, non trae alcun piacere dalla vista delle figure geometriche (la retta, il triangolo o il cerchio). Preferirà indubbiamente una immagine più complessa, nella quale gli elementi su accennati si intreccino e si fondano, in modo da non poterli più analizzare e distinguere, singolarmente. Del pari, a un pittore dicon poco o nulla i colori semplici dei suoi tubi; egli vuol piuttosto un'armoniosa combinazione di tinte, sì da creare un'immagine ricca e vivace oppure smorta e delicata, secondo l'estro. Altrettanto avviene in musica; il nostro orecchio non si diletta affatto con le note pure e semplici che abbiamo sinora studiato; preferisce invece una sapiente fusione di esse. I vari

strumenti musicali ci forniscono alcune « fusioni » già pronte: il musicista le unirà, combinandole a suo talento.

Tratteremo, nel presente capitolo, i suoni emessi dalle corde, in stato di tensione — come, ad esempio, quelle usate nel pianoforte, nel violino, nella arpa, nella chitarra e nella cetra — e vedremo come va inteso il fatto che certi suoni risultano dalla combinazione delle note pure di cui abbiamo parlato.

ESPERIMENTI ATTUABILI COL MONOCORDO

La sorgente sonora della quale ora ci varremo non sarà più il diapason ma bensì il cosidetto « Monocordo », strumento noto sino ai matematici della Grecia antica, particolarmente a Pitagora, e che si trova ancora in molti gabinetti di Fisica Sperimentale. Consta essenzialmente, come vedesi in fig. 22, di una corda, il cui estremo A è fissato solidamente a una parete di legno. Il resto di essa passa sopra a un cavalletto fisso B e ad uno mobile C per poi scorrere nella gola della carrucola D e terminare nel supporto del peso W. Quest'ultimo serve a mantenere la corda tesa e si comprende come, variandolo, si possa accrescere o diminuire, a volontà, la tensione della corda stessa. Soltanto il tratto BC di essa vibra e, dato che il cavalletto C è spostabile in un senso e nell'altro, questo tratto può assumere la lunghezza voluta.

La corda può essere sollecitata in vari modi: percuotendola (come nel pianoforte), soffregandola con un archetto (come nel violino), pizzicandola (come nell'arpa) e finalmente investendola con un soffio d'aria, come avviene quando vibra un'arpa Eolia o

quando, in una giornata di tempo cattivo, il vento fa vibrare i fili del telegrafo.

Sollecitando la corda in un modo o nell'altro, udremo una nota musicale di determinata altezza. Ora, mentre risuona tuttora la vibrazione, premiamo sul peso *W*. Constateremo che, così facendo, cresce l'altezza della nota e quanto maggiore sarà la pressione, tanto più acuta sarà la nota emessa. La pressione ha valso ad aumentare la tensione della corda: ve-

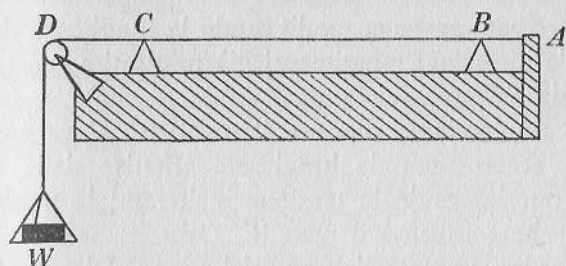



Fig. 22. - Il Monocordo. Il peso *W* conferisce alla corda una certa tensione; due ponticelli limitano il tratto che vibra (*BC*). Lo strumento indica altresì i valori della tensione e la lunghezza effettiva della corda.

diamo dunque che ad ogni aumento di tensione in una corda, corrisponde un incremento di altezza nel suono. Così appunto fanno i violinisti e gli accordatori di pianoforte per accordare il loro strumento: allorchè una corda dà un suono troppo basso, essi fan girare opportunamente e nel senso voluto il piròlo al quale la corda è connessa.

Per porre in evidenza la esatta relazione che sussiste fra la tensione della corda ed il suono emesso, ci varremo di una serie di esperimenti. Supponiamo che la corda, inizialmente, emetta il DO (ott. centr.) e che la tensione sia generata da un peso di 10 libbre (kg. 4,535). Perchè la nota giunga ad es-

sere il DO dell'ottava seguente occorre portare il peso a 40 libbre (kg. 18,14); per giungere all'ottava seguente (DO 2ª ott.) occorre che la tensione sia corrispondente al peso di 160 libbre (kg. 72 circa) e così via. In ogni caso, è necessario quadruplicare la tensione per raddoppiare la frequenza della nota emessa e questa, come vedremo, è una regola generale. La frequenza è perciò proporzionale alla radice quadrata della tensione.

Possiamo altresì compiere alcuni esperimenti per vedere cosa avvenga modificando la lunghezza della corda in esame; esperimenti già praticati a suo tempo da Pitagora (circa 2500 anni or sono). Se (vedi fig. 22) facciamo scorrere il cavalletto *C* verso destra, accorceremo la lunghezza effettiva della corda, pur lasciando la tensione inalterata; la tensione cioè che compensa il peso *W*. Orbene: accorciando la corda, aumenta l'altezza del suono. Dimezzando la lunghezza effettiva della corda, il suono salirà esattamente di un'ottava, mostrando con ciò che si è pure ridotto di metà il periodo della vibrazione. Variando la posizione del cavalletto *C*, verificheremo una legge generale e cioè: il periodo è direttamente proporzionale alla lunghezza della corda, il che equivale a dire che la frequenza invece varia in ragione inversa. Questa legge trova conferma in tutti gli strumenti a corda. Nel violino, ad esempio, ponendo il dito, sulla corda, a diverse altezze, otterremo varie note. Nel pianoforte, invece, si ottengono suoni di differente altezza usando gruppi di corde di diverse lunghezze.

Potremmo, anche, eseguire vari esperimenti per vedere i risultati che si ottengono mutando lo spessore della corda o la sostanza che la costituisce.

LE LEGGI DI MERSENNE

Nella sua opera: « Armonia universale » il matematico francese Mersenne (1636) formulò, per primo, le leggi seguenti; leggi nelle quali si riassume quanto abbiamo imparato dagli esperimenti trascorsi:

1ª - (Legge di Pitagora). In una corda acustica, sottoposta a una determinata tensione, il periodo della vibrazione è proporzionale alla lunghezza del tratto che vibra.

2ª - Mantenendo costante la lunghezza della corda, e facendone invece variare la tensione, la frequenza è proporzionale alla radice quadrata della tensione.

3ª - Ferme restando la lunghezza e la tensione, il periodo di vibrazione di una corda è proporzionale alla radice quadrata del suo peso.

Il pianoforte ci offre il modo di verificare queste tre leggi. Il costruttore di pianoforti avrebbe potuto ottenere tutte le frequenze che gli occorrono, usando corde di differenti lunghezze ma di egual struttura e mantenendo costante sia la sostanza costituente la corda che la tensione alla quale essa è sottoposta.

Occorre osservare peraltro che, nelle sette ottave e un quarto del pianoforte moderno, si hanno note le cui frequenze sono comprese fra i numeri 27 e 4096. Basandosi esclusivamente sulla legge di Pitagora, la corda più lunga dovrebbe essere 150 volte più lunga della corda più corta, e quindi il costruttore si troverebbe di fronte al seguente dilemma: o una corda eccessivamente lunga, o una eccessivamente corta. L'artefice si vale, quindi, della 2ª e 3ª legge di Mersenne. Evita perciò di dare una lunghezza eccessiva a quelle corde che, di solito, servono al-

l'accompagnamento, avvolgendole, per tutta la loro lunghezza, con un sottile filo di rame. Per evitare d'altra parte che alle note più alte corrispondano corde eccessivamente corte, egli aumenta, opportunamente, la tensione a cui sottoporle. Con la tavola armonica di un tempo, che era in legno, occorreva molta prudenza nel far ciò, giacchè la tensione a cui venivan sottoposte, complessivamente, 200 corde, la sottoponeva ad uno sforzo non indifferente. La tavola armonica moderna, essendo di acciaio, resiste ottimamente a una tensione complessiva di circa 30 tonnellate e perciò le corde possono venir sottoposte a tensioni praticamente inattuabili in altri tempi.

VIBRAZIONI LIBERE DELLE CORDE

Dopo aver verificato le leggi di Mersenne, passiamo ora a un esperimento un po' più complesso, noto col nome di « esperimento di Melde ». Togliamo, perciò, il cavalletto *B* assieme alla connessione *A* e sostituiamo la corda metallica con una cordicella di seta oppure un filo della stessa sostanza. Un estremo di quest'ultimo scorre tuttora nella gola della carrucola in *D* e sostiene il peso *W*. L'altro estremo, invece, verrà fissato solidamente al rebbio di un diapason. Tale apparecchio assumerà l'aspetto che vedesi in fig. 23.

Valendoci di un archetto da violino, facciamo vibrare il tratto *AC*, e questo, naturalmente, emetterà la nota corrispondente alla propria vibrazione libera. Udremo un suono piuttosto debole. Possiamo però far vibrare la corda soffregando, con l'archetto stesso, il diapason. Sappiamo già che, in tal caso, il diapason effettuerà la propria vibrazione indipen-

dente e la trasmetterà, anzi, l'imporrà alla corda. Questa quindi emetterà la nota corrispondente alla frequenza propria del diapason. Udremo perciò quest'ultima nota di frequenza, quasi sempre, diversa da quella della corda. Se invece le due frequenze coincidessero, interverrà il principio di risonanza e farà si che le vibrazioni risultanti, siano particolarmente vivaci e si rendano anche visibili.

Ora, se l'esperimento vien condotto con una serie di diapason, oppure con un solo diapason a frequenza variabile elettricamente, constateremo che le vi-

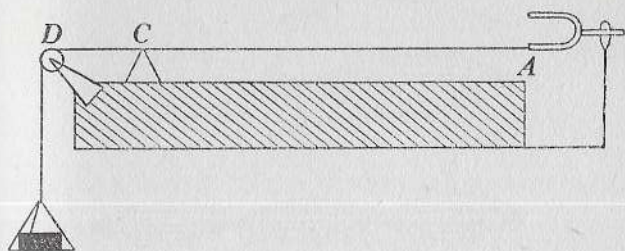



Fig. 23. - Il Monocordo come si dispone per l'esperimento di Melde.

brazioni della corda divengono talmente vivaci da esser visibili, non soltanto in corrispondenza alla nota di un singolo diapason, ma bensì per tutta una serie di frequenze. Evidentemente, quando ciò avviene, ci dev'essere risonanza fra il diapason e la corda; possiamo quindi concludere che: la corda possiede una vibrazione libera in corrispondenza ad ognuno dei diapason sperimentati (o a ciascuna delle varie note emesse dal diapason regolabile elettricamente). L'esperimento ci pone altresì in grado di identificare le varie frequenze delle diverse vibrazioni libere della corda.

Constateremo così, che le frequenze di queste vi-

brazioni libere son tutte multiple di uno stesso numero. Supponendo che il diapason a nota più bassa *che produca risonanza* abbia la frequenza di 256, troveremo che le frequenze degli altri diapason, sono appunto 512, 768, 1024; vale a dire la potenza seconda, terza e quarta della frequenza base 256.

In corrispondenza a ciascun diapason che la pone in risonanza, la corda assume diversi aspetti. Co-

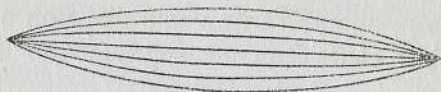



Fig. 24.

Fig. 25.

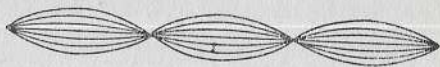



Fig. 26.

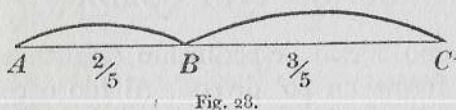
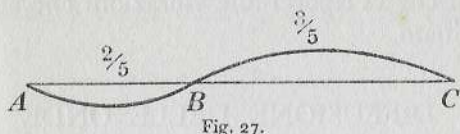
Figg. 24, 25 e 26. - Vibrazioni caratteristiche di una corda tesa. Questa, o vibra per intiero o si suddivide in 2, 3, 4 tratti uguali e, così facendo, emette la nota che gli è propria, l'ottava e la dodicesima.

sì, per esempio, in fig. 24, scorgiamo l'aspetto della corda allorchè vibra in risonanza col diapason di frequenza 256; poi, in fig. 25, quello assunto durante le vibrazioni del diapason di frequenza 512; in fig. 26 come appare la corda quanto vibra il diapason di frequenza 768 e così via. Il diapason la cui frequenza è tripla di quello più basso (256) fa vibrare la corda in tre parti e così via. Vediamo così che, in conformità alla legge detta di Pitagora, i periodi delle varie vibrazioni libere, son sempre proporzio-

nali al numero delle parti nelle quali la corda, vibrando, si suddivide.

Anche ripetendo varie volte l'esperienza non troveremo altre frequenze che quelle già indicate ed è facile verificare che non ve ne sono altre.

Supponiamo infatti che la corda *potesse* vibrare, separatamente, in due parti, corrispondenti, rispettivamente, ai due quinti ed ai tre quinti della lunghezza effettiva della corda (vedi fig. 27).

In conformità alla Legge di Pitagora, i periodi di

Figg. 27 e 28. - La corda vibrando può assumere l'aspetto che vedesi in fig. 27 ma *non* quello che vedesi in fig. 28.

queste due vibrazioni dovrebbero essere proporzionali ai singoli tratti vibranti, nei quali la corda si è suddivisa. Perciò le due frequenze starebbero fra loro nel rapporto 2 a 3. Dopo aver eseguita una vibrazione completa il tratto *BC* si troverebbe nuovamente nella posizione che vedesi in fig. 27. Però, a tale istante, il tratto *AB,* avendo compiuto una vibrazione e mezzo, verrebbe a trovarsi nella posizione indicata in fig. 28. Tale posizione, evidentemente, è irreale e non può sussistere per una corda che sia fissata soltanto nei punti *A* e *C*. Sarebbe possibile se la corda fosse fermata anche nel punto *B* ma, in tal caso, quel punto subirebbe una certa stratta. Senza questa stratta, il punto *B* della corda sarebbe stato

tratto verso l'alto prima che la corda avesse assunto la posizione indicata in fig. 28. La corda, quindi, non può assumere tale aspetto.

Con ciò abbiamo dimostrato il principio per un caso particolare ma è facile dimostrarlo valido in ogni caso. Non potendo la corda assumere la forma esposta in fig. 28, le vibrazioni dei vari tratti devono avvenire simultaneamente e perciò dovranno, tutte, avere lo stesso periodo. Ne consegue che i vari segmenti in vibrazione devon avere tutti la stessa lunghezza, il che ci riporta alle vibrazioni che abbiamo già esaminato.

DIFFUSIONE DELLE ONDE LUNGO UNA CORDA

Ripetiamo adesso l'esperimento eseguendolo, tuttavia, in forma un po' diversa. Al filo o cordicella di seta, della quale ci siamo valsi, sostituiamo un cordone o una funicella. Invece del diapason usiamo la nostra mano. Con essa teniamo il capo libero della fune e solleviamolo un po' assai lentamente. La funicella, per tutta la sua lunghezza, assumerà, così facendo, una posizione obliqua.

Se, adesso, abbassiamo nuovamente la mano, la funicella assumerà nuovamente la posizione orizzontale. Possiamo, invece, eseguire il movimento con maggiore rapidità: sollevare ed abbassar la mano a scatti, rapidamente. Entra in giuoco, così facendo, l'inerzia della funicella e vedremo che la prima fase del movimento ha determinato la propagazione, lungo la corda, di un'onda a mo' di cresta, mentre la seconda fase di esso diffonde un'altra onda, a forma di cavità questa volta e le due onde singole si seguono a brevi intervalli. A un dato istante la funi-

cella si presenterà come vedesi in fig. 29 (tracciato marcato e unito); l'istante successivo si mostrerà come la traccia punteggiata della stessa figura. Ogni volta che un'onda giunge alla carrucola, vien riflessa lungo la funicella. È simile in ciò a quelle increspature che si formano nelle vasche per la caduta di un oggetto: le vediamo diffondersi lungo la superficie dell'acqua, urtare il bordo e, ivi giunte, tornare verso il punto di partenza.

Ci apparirà chiaro, adesso, come si sono svolte le cose durante l'esperienza di Melde, che abbiamo con-

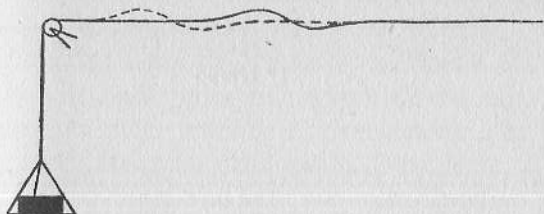



Fig. 29. - Una funicella tesa percorsa da una sola ondulazione.

siderato poco fa. Invece della mano avevamo il rebbio d'un diapason il quale, anzichè un solo movimento, diviso in due tempi, ne compiva una certa serie, regolarmente. Il rebbio non si limitava a diffondere una sola onda lungo la corda ma bensì tutta una serie, a intervalli regolari e queste, assieme con le onde riflesse, hanno determinato il movimento che abbiamo appunto osservato.

Quest'ultimo, tuttavia, corrispondeva o all'una o all'altra delle vibrazioni libere della corda e da ciò deduciamo che una vibrazione libera può venir rappresentata dalla composizione di una serie di onde in movimento. Nè va dimenticato che queste onde si muovono in due direzioni: infatti ve n'è in un sen-

so e nell'altro; quelle riflesse ritornano verso il diapason. Vediamo in fig. 30 come si compongono le onde nella produzione di vibrazioni libere.

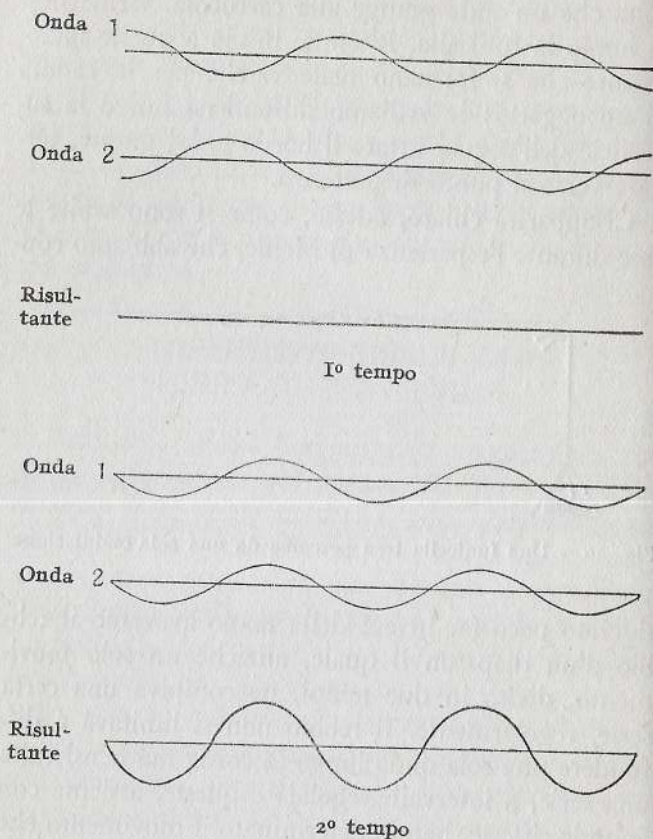



Fig. 30. - Due onde dànno luogo a una vibrazione. La N. 1 si muove verso sinistra, la N. 2 verso destra. Nel 1° tempo, le onde sono in fase opposta e si neutralizzano a vicenda. Lo spostamento risultante è quindi nullo. Però dopo ¼ di lunghezza d'onda, nell'uno e nell'altro senso, ha luogo il 2° tempo. Le due onde sono ora in fase, si rinforzano a vicenda e la risultante è quella che vedesi in figura. Prolungandosi il processo, va aumentando la differenza di fase, sinchè giunge ad essere di 180° e il movimento si ripete.

Il movimento assunto da una corda, nell'atto di dare un suono, può essere considerato in due modi diversi: come risultante da un certo numero di vibrazioni libere oppure determinato dalla composizione di onde in movimento. Sono due modi diversi di vedere uno stesso fenomeno.

Considerando il moto alla seconda stregua e cioè come: « onde in movimento » la legge di Pitagora ci offre, di esso, una spiegazione assai semplice. Dice infatti la legge: Il periodo di una vibrazione libera è proporzionale alla lunghezza della corda che vibra. Vale a dire, in altre parole, che le onde, lungo la corda, si muovono tutte alla stessa velocità.

Le altre due leggi di Mersenne ci dicono che la velocità delle onde varia in ragione diretta alla radice quadrata della tensione e inversamente alla radice quadrata del peso della corda. È evidente, d'altronde, che le leggi suddette son vere. Infatti: aumentando la tensione della corda, aumentiamo le forze che tendono a ricondurre la corda nella sua posizione iniziale e, così facendo, acceleriamo il moto stesso. Se d'altronde aumentiamo il peso della corda, aumentiamo la massa che queste forze devono spostare e perciò si rallenta il moto stesso. Per qualunque altro moto ondulatorio vigono analoghe leggi, beninteso con i dovuti cambiamenti.

ARMONICHE

Abbiamo già visto che, quando un mezzo è in vibrazione, il suo movimento va considerato risultante dalla composizione di un certo numero di vibrazioni libere.

Allorchè una vibrazione si effettua singolarmenme, ogni punto del mezzo compie un moto perio-

dico semplice, così come fa un punto del rebbio. Ne consegue che quando un suono musicale è prodotto dalla somma di diverse vibrazioni, queste devon essere tutte note semplici del tipo già visto; in altre parole: ciascuna di esse potrebbe essere emessa dalle vibrazioni libere di un dato diapason.

Nel caso speciale che abbiamo poco fa considerato, nel quale il mezzo vibrante è costituito da una corda tesa, le frequenze delle varie vibrazioni stanno, fra di loro, nel rapporto semplice 1/2, 2/3, 3/4: cosicchè il suono complessivo prodotto dalle vibrazioni della corda potrebbe ottenersi dalle vibrazioni simultanee di una serie di diapason le cui frequenze fossero appunto nel rapporto suddetto 1/2, 2/3, 3/4, 4/5: e così via. Cominciamo, così, a comprendere perchè il suono di un violino o di un pianoforte è più ricco e più attraente di quello emesso da un diapason.

Considerazioni d'indole teorica ci hanno chiarito che, quando una corda vibra, vengono prodotti suoni che hanno frequenze come quelle sopraddette e non altre. Ora, facendo uso dei risuonatori di Helmoltz oppure di un analizzatore di suoni del tipo già descritto, possiamo accertare che così avviene. Quando, ad esempio, la corda di un violino suona il DO dell'ottava centrale, di frequenza 256, verranno posti in vibrazione, per risuonanza, i risuonatori di frequenza 256, 512, 768, 1024, 1280, ecc.; gli altri no.

Possiamo altresì — e l'abbiamo già accennato — far uso delle corde del pianoforte come risuonatori. Si sollevano gli smorzatori (basta premere il pedale del forte) e si suona, con un violino, il DO dell'ottava centrale. Il violino dev'essere stato previamente accordato con lo stesso DO del piano. Constateremo

che, per risonanza, entrano in vibrazione le corde del piano che danno il DO ottava centrale ma che, assieme a quelle, vibrano anche le seguenti note: DO (1^a ott.) SOL (1^a ott.) DO (2^a ott.) MI (2^a ott.) SOL (2^a ott.) SI♭ (2^a ott.) DO (3^a ott).

Riferendoci alla tavola delle frequenze a pag. 46, abbiamo compilato la seguente tabella nella quale le frequenze delle note suddette figurano nella 2^a riga, mentre nella 3^a riga sono indicate le frequenze delle vibrazioni della corda di violino.

Nota del pianoforte	DO (ottava centrale)	DO 1^a ottava	SOL 1^a ottava	DO 2^a ottava	MI 2^a ottava	SOL 2^a ottava	SI♭ 2^a ottava	DO 3^a ottava
Frequenza	256	512	767	1024	1290	1534	1825	2048
Frequenza della corda	256	512	768	1024	1280	1536	1792	2048
Numero della armonica	1	2	3	4	5	6	7	8

Fra le varie note emesse dalla corda che vibra, quella di minor frequenza (il 256, nel nostro caso) vien detta « nota fondamentale ». Le altre note, pure, che son fuse — per così dire — nel suono complessivo della corda, son dette: « armoniche ». La nota fondamentale è detta altresì « la prima armonica »; quella di frequenza che maggiormente si avvicina ad essa vien chiamata: « seconda armonica » e così via.

La precedente tabella ci dice che la seconda armonica è l'ottava della fondamentale; la quarta è la quindicesima. La terza, però, non coincide esattamente col dodicesimo SOL della 1^a ottava e da ciò, come vedremo in seguito, ha origine una questio-

ne che discuteremo a suo tempo. Per il momento, tuttavia, possiamo considerare la terza armonica come la dodicesima della nota fondamentale. Con analoga approssimazione possiam dire che la quinta armonica è la diciasettesima; la sesta è la diciannovesima, e così via.

Valendoci del piano quale risuonatore, possiamo, non solo verificare la frequenza di queste armoniche, ma rilevare anche la natura delle vibrazioni che le producono. Abbiamo già visto, ad esempio, che quando sul pianoforte suona il DO (ott. centrale) si pongono in vibrazione per risonanza le corde delle note DO (1ª ott.), SOL (1ª ott.), DO (2ª ott.), ecc. e ciò dimostra che le corde del DO (ott. centrale) son capaci di emettere vibrazioni libere di frequenza uguale a queste note più alte. Invertiamo, adesso, l'esperimento e suoniamo, sul pianoforte, il DO (1ª ott.). Dato che le corde del DO (ott. centr.) son capaci di emettere vibrazioni libere della stessa frequenza della nota che ora sta suonando, esse verranno poste in vibrazione. Se avessimo posto alcuni « cavalieri » in truciolo di legno su di esse, al modo già detto, questi cadrebbero. Però se uno di questi trucioletti si trovasse esattamente alla metà della corda, esso non verrebbe sbalzato. Tutti gli altri si e questo no. Vorrà dire, quindi, che la corda vibra per tutta la sua lunghezza, eccetto che in questo suo punto mediano. Si spiega il fatto pensando che la corda, vibrando si divide in due metà, come vedesi in fig. 25. Allo stesso modo possiamo verificare che, facendo suonare il SOL (1ª ott.), la corda del DO (ott. centr.) si suddividerà, risuonando, in tre parti uguali, al modo che abbiamo visto in fig. 26. E così di seguito.

VENTRI E NODI

Valendoci di una buona macchina fotografica, cogliamo l'immagine istantanea di una corda mentre essa compie una vibrazione libera. Ci risulterà che la forma assunta da essa, in qualunque istante, è quella della sinusoide o curva armonica semplice che, a suo tempo, abbiam già vista. Tale fatto trova conferma nelle dimostrazioni matematiche e si può, rigorosamente, dimostrare che così deve essere, purchè la corda sia perfettamente flessibile e di struttura omogenea ed uniforme.

Si chiama spostamento il tratto *PQ* del quale si sposta un punto della corda dalla sua posizione nor-

Fig. 31. - La curva, descritta da una corda che compie una vibrazione singola. è sempre una sinusoide.

male (che è *P*). Percorrendo la corda vediamo che il tratto *PQ,* rappresentante lo spostamento, va continuamente crescendo per poi scemare. Quei punti nei quali lo spostamento è nullo vengon detti « nodi ». Evidentemente saran tali gli estremi della corda o quegli altri punti nei quali essa vien solidamente fissata. Gli altri, che abbiam esplorato coi « cavalieri » di truciolo, sono sparsi fra questi due che sono estremi. I punti, invece, ove lo spostamento è massimo, son detti: « ventri » e sono posti fra i nodi. Toccando una corda in un suo nodo, non si ostacola la vibrazione, dato che, in quel punto, non avviene movimento di sorta. In qualunque altro punto la si tocchi, si spenge la vibrazione. Eccezion fatta dunque per i nodi, il toccare un punto che tale

non sia provoca la cessazione del moto vibratorio, quando questi non sia costituito da una vibrazione singola. Così, per esempio, toccando la corda del DO (ott. centr.) di un pianoforte, nel suo punto di mezzo, mentre sta vibrando, facciamo, bensì tacere le note DO (ott. centr.) SOL (1ª ott.) MI (2ª ott.) ecc., ma, per contro, non infirmiamo affatto le vibrazioni delle corde corrispondenti alle note: DO (1ª ott.) DO (2ª ott.) SOL (2ª ott.), ecc. Infatti: il *punto di mezzo* della corda è un nodo per tutte le armoniche di numero pari. I violinisti, che lo sanno, premono leggermente la corda del loro strumento, nei vari punti che corrispondono ai nodi e così facendo, provocano il suono di note armoniche.

IL SUONO DELLA CORDA TESA

Abbiamo dunque visto che, il fatto di suonare la nota DO (ottava centrale) in un violino o pianoforte, equivale a suonare l'accordo di note pure tracciato a destra in fig. 32.

Perciò il suono risulterà più nutrito e più vivace della nota emessa da un diapason, e segnata a sinistra, nella stessa figura.

In figura 32 tutte le armoniche sono state indicate come se venissero emesse con ugual forza. In pratica invece avviene che la nota fondamentale e le armoniche più basse siano essenzialmente più intense delle altre; queste, man mano che si sale in altezza divengono più deboli. In teoria, l'accordo tende all'infinito; in realtà, invece, le armoniche superiori alla 6ª ed alla 7ª son talmente deboli da non poter più esser udite. Perciò la nota risulterà, complessivamente, come quella riprodotta in fig. 32. Avendo riguardo alla musica, è una vera fortuna

che così sia e non altrimenti, giacchè varie armoniche alte (incluse tutte le armoniche dispari, sopra alla 5ª) formano una dissonanza, con la fondamentale.

La fig. 32 si riferisce unicamente al caso di una corda tesa. Anche vari altri mezzi dànno luogo a vibrazioni semplici, ben distinte, ma le loro frequenze non sono collegate da rapporti semplici ed elementari come quelli che abbiamo già determinato. Questa semplicità è caratteristica della corda tesa:

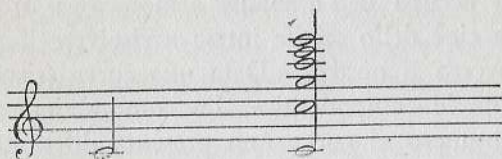



Fig. 32. - Il diapason emette soltanto note pure. Invece il suono emesso dalla corda di un violino è formato da *un accordo* di note; si comprende quindi come esso sia più ricco, musicalmente, e più colorito.

vero si è, però, che le vibrazioni di una colonna d'aria (come avviene nel flauto o nelle canne d'organo) le si avvicinano molto, nei loro rapporti.

Invece le vibrazioni di una membrana tesa, com'è il tamburo, o quelle di altri strumenti (come le campane, i piatti e il triangolo) non son rette da rapporti semplici, e perciò i suoni emessi sono, di solito, musicalmente discordi. Abbiamo visto un esempio di questo fenomeno nel « suono parziale » di un diapason.

Quanto ora diremo varrà a chiarire perchè le vibrazioni emesse da una corda tesa sian di natura semplice e al tempo stesso musicale.

Abbiamo già, nel corso delle pagine precedenti, composto due sinusoidi ed abbiam visto la curva risultante. Essenzialmente, il processo della composizione è stato illustrato a pag. 53, fig. 12 e a pag. 59, fig. 19. In ognuno dei due casi, eran soltanto due le curve componenti. Quando invece si tratta di un numero maggiore di moti, la curva risultante può assumere una forma assai complicata.

Nel campo delle matematiche, vi è un capitolo che si occupa dell'« analisi armonica »; di quella branca cioè dello scibile intesa a risolvere il problema inverso al nostro. « Data una curva (risultante) trovarne le componenti ». La composizione di un certo numero di curve non presenta difficoltà considerevoli: può essere paragonata al compito di chi debba mescolar sali e prodotti chimici in una provetta. Chi non saprebbe farlo? Invece, il problema opposto, quello di riuscire a individuare quali e quanti elementi siano entrati a far parte nella composizione di una certa sostanza, di cui nulla o poco si conosce, può esser quanto mai difficile.

Fortunatamente, il problema è più semplice per il matematico che per il chimico. Infatti il processo inteso all'analisi di una qualunque curva (anche se complicata) negli elementi che la costituiscono è relativamente semplice e si basa sul teorema detto di Fourier, dal nome del grande matematico francese che lo scoperse (J. B. J. Fourier: 1768-1830).

Detto teorema ci dice che qualunque curva, indipendentemente dalla sua natura specifica e dal modo col quale ebbe origine, può esser riprodotta esattamente componendo un certo numero di moti periodici semplici. In altre parole: qualunque curva

può venir ricostruita sommando opportunamente alcuni moti ondulatori.

Il teorema ci dice altresì che basta valersi di onde di determinata lunghezza. Per esempio: se la curva originale si ripete, regolarmente, a intervalli di 30 cm. ci varremo esclusivamente di curve che si ripetano regolarmente una, due, tre, quattro... volte ogni trenta centimetri; onde, cioè, di m. 3,60, 1,80, 1,20, 0,90 ecc. E ciò, se ci pensiamo, è ovvio giacchè onde di lunghezza diversa, come sarebbe metri 4,50 o m. 1,25 impedirebbero alla curva risultante di ripetersi regolarmente ogni 30 cm. Qualora la curva originale non si ripeta regolarmente, considereremo l'intiero suo percorso come il primo semi-periodo di una curva che si ripeta ed otterremo, così facendo, il teorema nella sua forma usuale (1). Esso ci dice che la curva originale può esser costituita da moti periodici semplici siffatti che il primo abbia una intera semionda compresa nella curva originale; il secondo abbia due intiere semionde, il terzo tre e così via; quegli elementi che contenessero parti fratte di semionde posson venire trascurati. Esiste pure una regola relativamente semplice per calcolare l'ampiezza dei vari elementi componenti ma, esaminandola, usciremmo dai limiti imposti alla presente trattazione.

Una prima nozione dell'impiego che il teorema di Fourier trova nel nostro campo di indagine, ci vien fornita se supponiamo che la curva originale sia quella formata da una corda tesa in un istante qualsivoglia della sua vibrazione. Le figure 24, 25 e 26

(1) Può sembrar più semplice di considerare la curva originale come un intiero periodo della curva ricorrente (anzichè come il semi periodo) ma a ciò si oppongono motivi di indole matematica. - N. d. T.

a pag. 92 ci mostrano alcuni gruppi di curve armoniche semplici contenenti ciascuna una, due e tre semionde complete, nei limiti imposti alla corda in tensione. Immaginiamo ora estesa indefinitamente la suddetta serie di immagini e che quindi compaiano le successive curve contenenti 4, 5, 6, 7... *n* semionde complete. La serie di curve così ottenute costituisce, appunto, la serie delle curve componenti, previste dal teorema di Fourier. Da ciascun gruppo prendiamo una curva: avutone così un certo numero, componiamole al modo già visto. Il teorema ci dice che, scegliendo opportunamente le curve suddette e componendole, la risultante potrà coincidere con qualsiasi curva ci fosse capitato di considerare. Oppure, girando la questione: qualunque curva può venir decomposta nelle sue componenti e di queste: una apparterrà al gruppo rappresentato dalla fig. 24, una seconda al gruppo in fig. 25, una terza al gruppo in fig. 26, e così via.

Non è questo soltanto il modo di scindere una curva nelle sue componenti. Lo si può, anzi, fare in molti modi; alla stessa stregua che un foglietto di carta può venire spezzettato in mille modi diversi. Occorre avvertire però che il metodo testè citato è unico sotto un certo riguardo e ciò lo rende prezioso nella teoria della musica. Infatti allorchè noi decomponiamo la curva di una corda vibrante nel modo suddetto altro non facciamo che decomporre il moto della corda nelle sue vibrazioni libere e queste costituiscono le note componenti la nota espressa dalla vibrazione. Prolungandosi quest'ultima, ogni singola vibrazione libera persiste senza mutamento alcuno nella natura particolare della forza che l'anima (diremo: qualitativamente); si smorza invece quantitativamente e l'abbiamo già visto.

Se, invece, avessimo decomposto la vibrazione in un qualsiasi altro modo, sarebbe mutata continuamente la forza delle vibrazioni componenti (magari anche centinaia di volte al secondo) e perciò non avrebbe posseduto affatto la qualità musicale del suono prodotto dalla vibrazione principale.

Una teoria lata e comprensiva come questa può anche apparire oscura e complicata. Vedremo dunque di chiarirla, esemplificandola in modo tale da porla nel giusto risalto e mostrar così la sua grande importanza.

CORDE SOLLECITATE NEL LORO PUNTO DI MEZZO

Stringendo fra i polpastrelli il punto di mezzo di una corda tesa *AB,* spostiamolo verso l'alto di qualche po' sinchè venga a trovarsi in *C*. La corda assumerà la configurazione d'un triangolo $\widehat{ACB}$, come si vede in fig. 33.

La forma assunta dalla corda *ACB,* per quanto un po' insolita, può tuttora esser considerata « curva » e il nostro teorema ci dice che tale « curva » può esser ottenuta mediante la composizione di un certo numero di curve armoniche semplici. La fig. 34 ci mostra come, difatti, la curva $\widehat{ACB}$ può venir risolta nelle sue curve componenti; sommando (per così dire) le curve che si vedono in figura, avremo ricostruita la spezzata *ACB,* prescindendo dal fatto che vi è una differenza di scala: le grandezze, nella direzione verticale del disegno sono dieci volte maggiori di quelle in senso orizzontale; ciò all'intento di porre in evidenza le oscillazioni delle armoniche più alte.

Supponiamo adesso di mollare il punto C e che la vibrazione si effettui normalmente. Ciascuna delle curve di fig. 34, seguendo il ritmo della propria frequenza, andrà scemando ed aumentando, nel modo che abbiam già visto. La composizione delle cur-

Fig. 33.

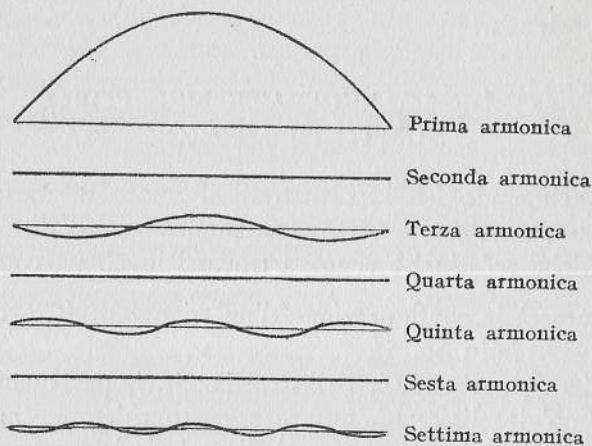



Fig. 34.

Figg. 33 e 34. - Lo spostamento della corda determina il triangolo $\widehat{ACB}$. Questa figura, che impropriamente, per omogeneità, chiameremo ancora « curva » può venir decomposta nelle sinusoidi della fig. 34. Componendo queste ultime, otterremo la « risultante » $\widehat{ACB}$ (fig. 33). Tuttavia, le misure, lungo l'asse delle y (verticalmente) sono tutte decuple di quelle prese orizzontalmente (lungo l'asse delle x).

ve, ad ogni istante, ci darà la forma che deve assumere la curva, in quel dato momento. Queste curve corrispondono alle varie armoniche che si generano, pizzicando la corda nel suo punto medio.

Ci accorgiamo, tuttavia, che non compaiono le armoniche N. 2, N. 4 e N. 6. Il fatto forma una particolarità del caso prescelto. Infatti, pizzicando la corda, come abbiam fatto, in modo che le sue due metà dovessero muoversi allo stesso modo, non potevan comparire la seconda, la quarta e la sesta armonica, pel suono delle quali occorre che le metà della corda si muovano in modo dissimile. Se, invece che nel suo punto medio, avessimo pizzicato la corda in un qualunque altro suo punto, avremmo udito certamente l'una o l'altra delle armoniche suddette.

ANALISI DI UNA « CURVA DEL SUONO »

Applichiamo ora il teorema di Fourier a un determinato tratto di una curva del suono. Il teorema asserisce che, componendo un certo numero di moti periodici semplici, opportunamente prescelti, si può ottenere una qualunque curva del suono. Ne consegue che è possibile risolvere qualunque suono in un certo numero di note pure e riprodurlo, esattamente, valendosi di una serie di diapason, anche se il suono è molto complesso. Invece dei diapason si possono usare altri strumenti che diano una nota pura. Accenneremo all'esperimento del Prof. Dayton Miller, il quale è riuscito, valendosi di un gruppo di canne da organo, che suonavano contemporaneamente, a produrre il suono delle cinque vocali. Mediante altri raggruppamenti è riuscito a modular le parole: papà e mamà.

Il diagramma di un suono musicale è periodico: l'ondulazione ricorre a intervalli perfettamente regolari. Abbiam visto, al riguardo, che è proprio questo l'elemento caratteristico che distingue la mu-

sica dai rumori. Il teorema di Fourier ci dice che tale curva si ottiene componendo un certo numero di moti periodici semplici, in modo però che in ciascun periodo della curva originale siano comprese una, due, tre... *n* onde complete; *n* dev'essere un numero intero. Se, per esempio, la curva del suono ha una frequenza di 100 periodi, si otterrà componendo moti armonici semplici di frequenza: 100, 200, 300... ecc.

Ognuno di questi moti rappresenta una nota pura; vediamo quindi che ogni suono musicale di frequenza 100 risulta composto dalla fusione di note pure che hanno 1, 2, 3... *n* volte la frequenza del suono originale. Orbene tali suoni vengon chiamati: « armoniche naturali » della nota in questione.

LE ARMONICHE NATURALI E IL FENOMENO DELLA RISONANZA

In un mezzo sonoro, le vibrazioni, vengon spesso, prodotte da una forza che sollecita con intensità continuamente variabile. Detta forza può esser periodica e in tal caso le variazioni avvengono a intervalli regolari. Il teorema di Fourier ci avverte che una forza variabile di questo tipo, può venir risolta in un certo numero di forze componenti, ognuna delle quali varia seguendo la legge dei moti periodici semplici; inoltre che le frequenze di queste componenti saranno 1, 2, 3... *n* volte quella della risultante. Per esempio: se la forza che determina la vibrazione ricorre 100 volte al secondo, le componenti (armoniche semplici) di essa ricorreranno 100, 200, 300... *n* volte al secondo.

Se il mezzo che vibra possiede vibrazioni libere, proprie, di frequenza 100, 200, 300, esse verranno

magnificate, per risonanza, mentre ciò non avverrà per altre vibrazioni di frequenza diversa da quelle. In altre parole: in presenza di una forza che solleciti un dato mezzo e ne provochi la vibrazione, si desteranno soltanto, per risonanza, le « armoniche naturali » di quella nota che ha la stessa frequenza del moto periodico provocato da quella forza.

Per quanto concerne la musica, questa legge riveste un'importanza particolare e lo vedremo in seguito. Fra l'altro, essa ci spiega perchè una corda tesa possieda qualità musicali così eccellenti. Infatti le vibrazioni libere della corda possiedono la stessa frequenza delle armoniche naturali della sua nota fondamentale e perciò, allorchè questa si fa sentire, vibreranno, per risonanza, anche le armoniche.

IL TIMBRO E L'ANALISI ARMONICA DEL SUONO

S'intende per « timbro » la qualità che è caratteristica di un dato suono; qualità che ce lo farà distinguere fra vari altri. È dal timbro che noi riconosciamo lo strumento che un dato suono emette, la voce umana o la qualità di un registro d'organo, e ciò a prescindere dall'altezza o dall'intensità della nota udita.

Gli studi di Helmoltz hanno dimostrato che il timbro di un suono è determinato dalla proporzione con cui vengono udite le armoniche naturali di esso. La cosa appare comprensibile quando si pensi che più sono le armoniche che entrano a far parte della nostra percezione auditiva, tanto più ci allontaniamo dal suono caratteristico del diapason. In esso infatti mancano completamente le armoniche alte. Possiamo, perciò, asserire che le armoniche su-

periori aggiungono colore ed emotività a un suono e lo rendon più nutrito. Dato inoltre che esse sono un'ottava più acute, ciò varrà a conferirgli chiarezza e, probabilmente anche vivacità.

Occorre studiar bene in ogni loro particolarità gli effetti di ciascuna armonica. Esistono oggi numerosi mezzi per comporre le varie armoniche, a nostro piacimento, e studiarne poi gli effetti conseguiti. Negli organi chiesastici la tastiera è spesso provvista di tasti che fanno suonare le prime otto armoniche separatamente. Combinandole a piacere, si otterranno suoni di diverso timbro, dei quali poi si potrà determinare la percentuale di armoniche. Nelle tastiere dei grandi organi si trovavano spesso simili gruppi di tasti. Oggi disponiamo anche di strumenti elettrici che permettono di fondere le varie armoniche in quella misura che riteniamo più efficace.

Così nel celebre organo elettrico di Hammond, provvede una corrente elettrica alternata di determinato periodo a produrre le note pure. Ogni tasto provvede all'emissione di nove note pure che costituiscono una scelta delle armoniche della nota normale del tasto o della ottava inferiore (1).

L'organo suddetto non contiene registri nel senso proprio del termine, ma la presenza o l'assenza delle varie armoniche e la misura con la quale esse partecipano è regolata da speciali stecche che si possono spostare convenientemente. A seconda della scelta delle armoniche si avranno suoni di diversa indole. Chè anzi, i fabbricanti di strumenti del genere forniscono, con l'organo, delle « ricette » (per così dire...) atte a

(1) Sono, di fatti, la nota fondamentale, la 2ª, 3ª, 4ª, 5ª, 6ª, e 8ª armonica assieme all'ottava inferiore e alla quinta inferiore.

produrre suoni di vario timbro. Per esempio, ecco la tabella nella quale a seconda della tonalità che si vuol ottenere (prima riga) vien indicata la misura nella quale deve concorrere una data armonica.

	Suono di corda	Suono di Diapason	Suono di clarinetto	Suono di canna
Fondamentale	1	7	6	5
Ottava	4	7	4	5
Dodicesima	5	5	7	5
Quindicesima	5	5	0	5
Diciasettesima	5	2	5	5
Diciannovesima	5	2	2	5
Ventiduesima	5	0	0	5

In qualunque modo si conduca l'esperimento, il risultato sarà, a un dipresso il seguente:

Il timbro dipende esclusivamente dalla forza che anima le varie armoniche e non dalla loro differenza di fase. Le differenze di fase non producono effetto di sorta sull'orecchio. È questa la cosidetta Legge di Ohm, scoperta da G. S. Ohm (1787-1854) maggiormente noto per la legge di elettricità che porta il suo nome.

La seconda armonica aggiunge solo chiarezza e risalto ma non altro, giacchè è un principio generale che l'aggiunta dell'ottava 2ª armonica non può introdurre differenza di timbro o altra caratteristica musicale. Allorchè la seconda e la prima armonica concorrono con uguale intensità, si ottiene un effetto paragonabile al suonare in ottava al pianoforte (anzichè in note singole) o porre il registro di ottava suonando l'organo o l'harmonium.

La terza armonica concorre a dare risalto al suono, a causa della tonalità alta che possiede, ma modifica un po' il timbro inquantochè rende la nota

più grossa, le conferisce una certa nasalità, come se uscisse da una gola e da un legno cavo. È infatti uno degli elementi essenziali del suono del clarino (vedi tabella precedente).

La quarta armonica, essendo due ottave sopra alla fondamentale, aggiunge maggior chiarezza e vivacità ma, per la ragione già vista, a ciò si limita. La quinta, oltre alla chiarezza, conferisce al suono una certa tonalità che ricorda quella del corno; la sesta poi aggiunge un timbro che è nasale e squillante al tempo stesso.

La tabella a pag. 99 mostra che tutt'e sei queste armoniche fanno parte della corda che dà la nota fondamentale e formano un'assonanza sia con questa nota che l'una con l'altra. La settima armonica, però, introduce un'elemento di dissonanza: se infatti la nota fondamentale è il DO (ott. centr.) l'altezza di esso è, press'a poco quella di un SI♭ (2ª ott.) nota in dissonanza col DO. Lo stesso è vero della 9ª, 11ª, 13ª e di tutte le armoniche più alte e dispari. Tutte queste aggiungono dissonanza e una certa tonalità squillante alla nota fondamentale; costituiscono quindi un elemento di asprezza al suono. Infatti esso avrà quel certo timbro che dicesi « metallico »; così come un pezzo di metallo, quando venga percosso, emette un suono ricco in note alte e discordi.

SINTESI ARMONICA

Dato che la pienezza e la qualità di una nota dipendono esclusivamente dalla misura con la quale le varie armoniche concorrono a formarla, è chiaro che la fusione e la mescolanza delle armoniche è altrettanto importante per la produzione di un bel

suono quanto... gli avvisi pubblicitari dicono che ciò sia essenziale per un tabacco aromatico o un tè olezzante. Vediamo dunque di scoprire il segreto in virtù del quale uno strumento fonde assieme le proprie armoniche, in modo da dare al suono emesso, quella qualità sonora che un orecchio musicale esige.

Per affrontare il problema, possiamo valerci di un risultato già ottenuto, che ci fornisce un indizio efficace a tale scopo.

Ricorderemo infatti di aver già trovato la seguente norma: « Allorchè una corda tesa vien pizzicata a metà, mancano al suono così prodotto, la 2ª e la 4ª armonica, mentre se la corda vien pizzicata in qualunque altro suo punto, tali armoniche si fan sentire ».

Ora la 2ª e la 4ª armonica son proprio quelle che conferiscono chiarezza e risalto alla nota; perciò, pizzicando la corda a metà, al suono così ottenuto mancheranno le due prerogative suddette. Esso avrà piuttosto un timbro cavo, nasale, che ricorderà quello del clarino o di una canna d'organo chiusa, giacchè i suoni emessi da questi ultimi son ricchi essenzialmente di armoniche dispari.

Si dimostra quindi che la qualità del suono emesso da una corda, dipende dal punto in cui essa vien pizzicata e l'analisi armonica conferma appunto questo risultato. Essa ci dice che la forza che anima, al suo ingresso, un'armonica, dipende dal prodotto di due fattori distinti e cioè quelli che potremmo chiamare: fattore « posizione », e fattore « ordinale ». Li vedremo subito, uno dopo l'altro.

Il fattore « posizione » dipende esclusivamente dal punto in cui vien pizzicata la corda e, quanto

alla sua importanza, è presto detto. Tracciamo la sinusoide corrispondente alla vibrazione della corda in atto di dare l'armonica in parola (vedi fig. 31 a pag. 101). Orbene: se la corda vien pizzicata o percossa in P, il fattore in questione è semplicemente PQ^2, vale a dire il quadrato dello spostamento PQ. Quando passiamo da un nodo a un ventre, il fattore cresce costantemente da zero al suo valor massimo. Per ottener un'armonica con la massima intensità dovremo quindi pizzicar la corda in un ventre; se invece la vogliamo eliminare pizzicheremo la corda in un suo nodo.

È questo un risultato assai importante e, del fatto, avevamo già incontrato un esempio. Il punto medio di una corda è un nodo per tutte le armoniche di ordine pari e un ventre per quelle dispari, cosicchè, se noi pizzichiamo una corda nel suo punto medio, saranno assenti dal suono tutte le armoniche pari, comprese l'ottava, la quarta e tutte le superiori (risultato già ottenuto), mentre si faranno udire, al massimo, tutte le armoniche dispari. Allo stesso modo, pizzicando una corda a un terzo della sua lunghezza, verrà a mancare la 3ª armonica: ma la 2ª (cioè l'ottava) e la 4ª, si faranno udir distintamente, e conferiranno al suono una tonalità chiara e brillante. Se invece sollecitiamo la corda a un quarto della sua lunghezza, udremo in pieno la 2ª armonica, mentre mancherà totalmente la 4ª, la 3ª e la 5ª si udranno ma debolmente.

Il fattore ordinale, dal canto suo, oltrechè dall'armonica, dipende anche dal modo di sollecitazione attuato. Varia quindi a seconda che la corda sia stata percossa o pizzicata.

DEL PIZZICAR LA CORDA

Se la corda vien pizzicata (come avviene nell'arpa, nella chitarra e nell'arpicordo), il fattore ordinale si individua facilmente: esso è proporzionale al reciproco del quadrato del numero ordinale dell'armonica considerata. Vale a dire: assegnando il valore 1 a questo fattore per la 1ª armonica, esso sarà 1/4 per la 2ª, 1/9 per la 3ª, 1/16 per la 4ª, e così via. Il fattore per la 7ª armonica è già 1/49 vale a dire poco più del 2 per cento, quindi le armoniche superiori alla 6ª concorrono poco al suono. Abbiamo già rilevato che le prime sei armoniche (per esempio DO (ott. centr.) DO (1ª ott.) SOL (1ª ott.) DO (2ª ott.) MI (2ª ott.) SOL (2ª ott.) sono proprie del suono della corda tesa; si spiega così che, pizzicando una corda, il suono che si ottiene è esente da armoniche dissonanti e perciò quasi completamente musicale.

DEL PERCUOTER LA CORDA

Percuotendo una corda piuttosto vivacemente con un martelletto duro, il fattore ordinale è ancor più semplice; si mantiene costante per ciascuna armonica. Dato il numero stragrande di armoniche esistenti, potrebbe apparire che l'energia del suono prodotto dovesse andar suddivisa egualmente fra questo numero pressochè infinito, col risultato che ogni singola armonica non riceverebbe parte apprezzabile di energia. Invece la teoria matematica al riguardo è basata sul presupposto che la corda sia perfettamente flessibile. Ma, in realtà, così non è, e questa deficienza di elasticità infirma considerevolmente le armoniche alte, giacchè impedisce loro di suo-

nare con l'intensità richiesta e talvolta di farsi udire affatto. Pur così essendo, il numero di quelle armoniche che restano a dividersi l'energia in parti pressochè uguali è sempre grande, cosicchè l'aliquota che a ciascuna tocca è ben poca. Perciò alla nota fondamentale e ad alcune armoniche, fra le più basse, tocca scarsa parte dell'energia totale, mentre la massima parte di essa va alle armoniche alte, che son le più. Dato poi che queste sono discordanti sia con la nota fondamentale che fra loro, avremo come risultato un suono acuto, squillante e di timbro prettamente metallico. È il suono caratteristico che si ode allorchè, accidentalmente, cade una chiave o una moneta sulla corda di un pianoforte.

La seguente tabella espone i risultati ai quali abbiamo accennato e mostra il divario esistente fra i due tipi di suono sino ad ora considerati.

IL SUONO DEL PIANOFORTE

Nel pianoforte la corda vien percossa da un martelletto feltrato. Il feltro prolunga la durata della percossa, cosicchè al momento in cui il martelletto si stacca dalla corda si sarà già posto in vibrazione un tratto non indifferente di essa. Ciò vale a ridurre l'energia che andrebbe spesa nelle armoniche alte e perciò vien evitato quel suono metallico che è significato nella ultima riga della precedente tabella. Siccome abbiam visto che i suoni discordi hanno inizio con la 7ª armonica, il martelletto dovrebbe esser sufficientemente feltrato per ridurre al minimo la settima armonica e le seguenti (9ª, 11ª, ecc.).

Anche se il martello fosse duro come l'acciaio, la settima armonica potrebbe venir totalmente eliminata, facendo sì che il percussore colpisse la corda

Come viene distribuita l'energia fra le varie armoniche nel suono di una corda

Numero d'ordine dell'armonica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nota	DO (ottava centrale)	DO (1ª ottava)	SOL (1ª ottava)	DO (2ª ottava)	MI (2ª ottava)	SOL (2ª ottava)	SI♭ (2ª ottava)	DO (3ª ottava)	RE (3ª ottava)	MI (3ª ottava)	—	SOL (3ª ottava)	—	SI♭ (3ª ottava)
Come vien distribuita l'energia (corda pizzicata)	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{49}$	$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{81}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{121}$	$\frac{1}{144}$	$\frac{1}{169}$	$\frac{1}{196}$
Idem (corda percossa)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

a un settimo della sua lunghezza a partire da un estremo giacchè, come sappiamo, questo punto è un nodo per la vibrazione. Così facendo, però, la nona e la undecima armonica si udranno piuttosto intensamente, dato che i loro fattori « posizione » sono 0,60 e 0,30 rispettivamente. Volendo si potrebbe sopprimere la 9ª armonica, colpendo la corda a un nono della sua lunghezza, ma con ciò la 7ª e l'11ª si farebbero sentire in misura corrispondente a 0,41. In pratica, la percussione di una corda avviene a un settimo della sua lunghezza dall'estremo, per quanto valendosi di un martelletto feltrato, ciò non elimini completamente la 7ª armonica. A volte si cerca di giungere a una transazione fra l'eliminazione della 7ª e della 9ª armonica. Ma non vi è transazione che valga per far sì che entrambe queste armoniche vengano eliminate. Il fabbricante di pianoforti deve curare al massimo il rivestimento di feltro dei martelletti giacchè se questi si assottigliano o si induriscono eccessivamente per uso troppo prolungato, si udranno echeggiare le armoniche alte che dànno al pianoforte un suono metallico; suono che fa pensare a quello di una lastra di stagno percossa. Un effetto analogo si avrà se i martelletti colpiscono con violenza le corde; infatti il feltro, così facendo, si comprime eccessivamente durante la percussione. D'altronde quando si colpisca con forza eccessiva, qualsiasi martelletto, anche il più feltrato, agirà come se fosse di ferro e provocherà un clangore metallico tutt'altro che musicale.

La tabella che segue, redatta da Helmoltz, mostra l'energia che anima le varie armoniche in una corda che sia percossa, con impeto vario, a un settimo della sua lunghezza. La forza di percussione è misurata in base a una frazione del periodo della no-

ta fondamentale, le cui corde vengono a contatto col martelletto.

Armonica	Corda percossa con un martello durissimo	Corda percossa con un martelletto feltrato. La durata del contatto è espressa dalle seguenti frazioni decimali del periodo della nota fondamentale				Corda pizzicata
		A	B	C	D	
	0,00	0,15	0,21	0,3	0,43	
1 (DO ott. cent.)	100	100	100	100	100	100
2 (DO 1ª ott.)	325	286	249	189	100	81
3 (SOL 1ª ott.)	505	357	243	108	9	56
4 (DO 2ª ott.)	505	260	119	17	2,3	32
5 (MI 2ª ott.)	325	108	26	0	1,2	13
6 (SOL 2ª ott.)	100	19	1,3	1,5	0,01	3
7 (SI♭ 2ª ott.)	0	0	0	0	0	0

Rileviamo da questa tabella che, con un martelletto feltrato, predominano la nota fondamentale e l'ottava, mentre con un martello duro si odono maggiormente le armoniche più alte; il che conferma e illustra i principi generali sin'ora esposti.

Helmoltz trovò che i valori esposti nella colonna *D* rappresentano l'energia relativa alle armoniche di un suono prodotto, sul suo pianoforte, in prossimità del DO (1ª ott.) quelli nella colonna *C* andavano bene per la regione del SOL (1ª ott.) e che quelli della colonna *B* eran validi per tutti i tasti sotto al DO (ott. centr.). Perciò la nota fondamentale è più debole della 2ª armonica lungo quasi tutta la tastiera ed è più debole anche della 3ª armonica, almeno per un buon tratto.

Nei pianoforti moderni, provvisti di martelletti solidi e robusti, le corde vengon percosse con maggior celerità di quanto non avvenisse ai tempi di Helmoltz. Per questo motivo, la nota fondamentale e le armoniche inferiori assumono valori consi-

derevolmente più alti di quelli segnati nella tabella. Difatti le note più alte contengono ben poche armoniche ed è la 2ª (l'ottava) che più d'ogni altra si fa udire. D'altronde, in pratica, poco importa l'assenza delle armoniche più alte. Siccome l'orecchio umano non arriva a percepirle, anche se vi fossero, non le udremmo. Le note mediane contengono da quattro a dieci armoniche: talvolta anche più e la energia va suddivisa fra loro in parti pressochè uguali. Le note basse contengono solo una piccola percentuale della fondamentale; contengono invece moltissime armoniche alte: ne sono state infatti udite e identificate non meno di quarantadue. Può anche avvenire, in certi casi, che la nota fondamentale sia del tutto inaudibile, giacchè il nostro orecchio avverte soltanto le armoniche alte. Però le ricombina in modo da riprodurre la fondamentale; esamineremo, in seguito, questo fenomeno. Le immagini 1 e 2 nella tavola III ci mostrano due fotografie, prese dal Prof. Dayton Miller, riproducenti le curve del suono delle note DO (1ª ott.) e DO della piccola ottava. Nel primo esempio, la fondamentale, DO (1ª ott.), si udrà, dapprima, più fortemente, quasi fosse la sola componente. Di lì a un quinto di secondo però si udrà l'ottava, piuttosto intensamente, e diverrà, in breve, la nota preponderante. Nella seconda fotografia, l'analisi dimostra la presenza di ben dieci armoniche, chiaramente udibili e di intensità variabile da un istante all'altro.

Anche analizzando la nota emessa dal pianoforte e scindendola nelle sue varie componenti al modo spiegato a pag. 82 ricaveremo dati che possono interessarci. Le figg 35, 36 e 37 mostrano i risultati conseguiti da Erwin Meyer, sperimentando su numerosi strumenti, antichi e moderni.

I sette diagrammi che vedonsi nelle striscie che compongono la fig. 35 mostrano i risultati ottenuti con sette DO (dal DO grande ott. al DO 4ª ott.) in un pianoforte a coda moderno. Le frequenze sono segnate sulla direzione orizzontale (asse delle x) e sono uguali per i sette diagrammi.

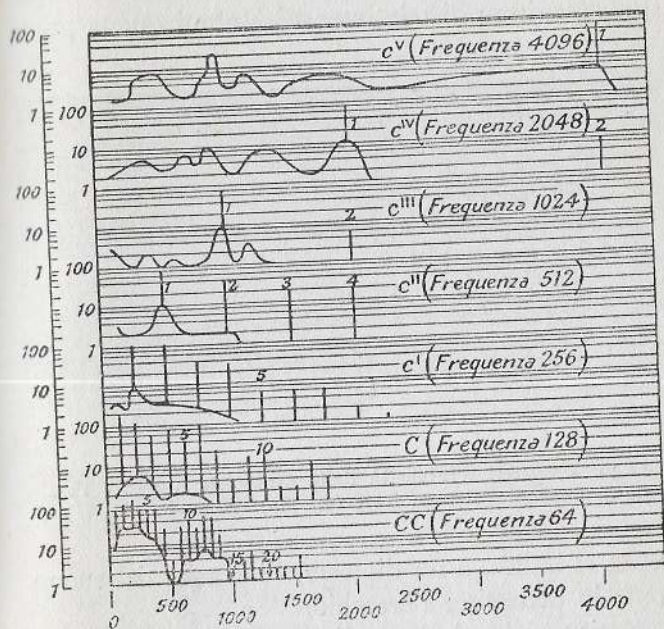



Fig. 35. - **Spettri d'intensità delle armoniche, durante l'emissione di note di varia frequenza, suonate** *mf* **al pianoforte.**

In ogni striscia la verticale segnata col numero 1 compare alla frequenza della nota suonata; mentre quelle segnate coi numeri 2, 3... ecc., ricorrono alle frequenze della 2ª, 3ª... armonica della nota che vien emessa. Perciò le linee verticali suddette indicano la posizione delle varie armoniche della nota in esperimento.

L'altezza delle linee verticali indica la relativa intensità di queste varie armoniche o, almeno, di quelle comprese nei limiti di sensibilità dei risuonatori impiegati durante l'analisi.

Occorre, tuttavia, notare che, in direzione verticale, l'altezza non è proporzionale all'intensità del suono quale risulta dall'apparecchio misuratore, bensì al logaritmo di tale intensità. Infatti questa gran-

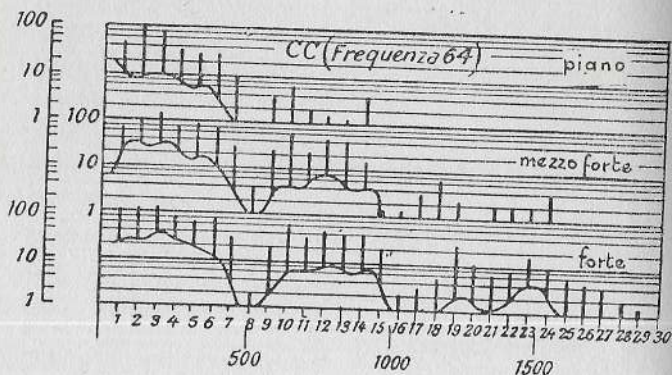



Fig. 36. - Spettri d'intensità delle armoniche durante l'emissione di una nota al pianoforte (a coda) suonando *pp*, *mf* e *ff*.

dezza ci indica, a un dipresso, l'intensità del suono, come lo percepisce l'orecchio.

Notiamo altresì che le lineette verticali non hanno inizio in piano bensì da una linea sinuosa, a montagnole, che rappresenta un miscuglio di note di ogni altezza. Non si comprende bene dove traggano origine tutti questi suoni discordi e inopportuni. Una certa parte di essi, probabilmente, dipende dalla differenza fra la corda reale del pianoforte (specialmente quelle con rivestimento metallico) e la corda che si immagina in teoria, sottile come una retta geometricamente intesa, infinitamente flessibile,

corda quindi dotata di caratteristiche astratte e perciò inesistente. Deve inoltre influire il fatto che il martelletto è ottuso e feltrato.

La distribuzione del suono fra le varie armoniche deve dipendere dalla forza con la quale vien suonata la nota. I risultati esposti in fig. 35 sono stati ottenuti suonando le note mezzo forte. In fig. 36 si vede come si distribuiscono le forze suonando

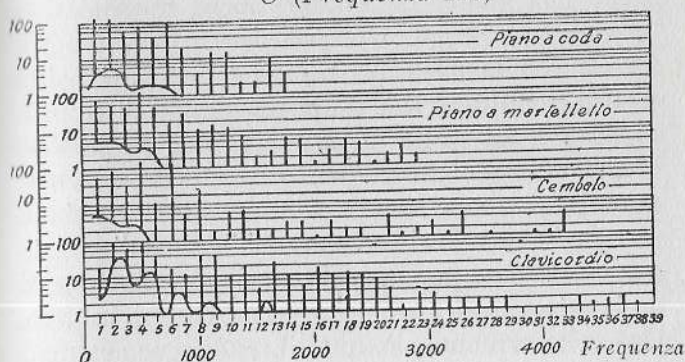



Fig. 37. - Spettri d'intensità delle armoniche di una nota suonata su un pianoforte a coda, moderno, e su altri strumenti musicali del passato.

la stessa nota DO (gr. ott.) pianissimo, mezzoforte e fortissimo. Rileviamo pertanto che un incremento di forza esercitato sui tasti provoca la comparsa di un maggior numero di armoniche, e ciò, in conformità ai principi esposti a pag. 120.

Finalmente in fig. 37 vediamo come si distribuiscono il suono prolungato e le armoniche di una stessa nota (DO piccola ott.) emessa da vari strumenti musicali. Il diagramma a capo della figura

(1) Strumento usato dagli zigani ungheresi.

(riferentesi al pianoforte a coda) altro non è che una riproduzione del sesto diagramma in fig. 35; gli altri tre si riferiscono a vari strumenti del tempo antico. Vediamo, dai diagrammi, come i suoni di questi ultimi fossero considerevolmente più ricchi di armoniche alte di quanto non avvenga col pianoforte moderno e come, per contro, difettassero di armoniche basse.

Molti pianisti son convinti di poter conferire al suono una grande espressione, anche trattandosi di una sola nota, e ciò quasi possedessero una loro arte segreta con la quale premere il tasto: altri poi, a sentirli, sono capaci di trarre un mondo di emozioni diverse dal suono di una sola nota. Risponde a queste asserzioni lo scienziato, con equo oggettivismo, informando che il pianista, allorchè abbassa un tasto ha un solo elemento variabile a sua disposizione e cioè la forza con la quale lo colpisce. Ciò determina la velocità del martelletto nel percuotere le corde. Una volta avvenuto ciò, tutto il resto segue automaticamente. Con ciò non si vuol dire che le varie note differiscano solo per l'intensità loro; differenti forze di percussione producono indubbiamente una differenza nelle proporzioni con le quali le varie armoniche concorrono al suono e ciò, naturalmente, altererà un po' la qualità emotiva della nota. Per esempio: una percussione con un mezzo molto duro fa aumentare la proporzione relativa delle varie armoniche alte e conferisce perciò alla nota un timbro poco musicale, aspro e intenso. È comprensibile che il suono che ne deriva faccia pensare all'ira, alla delusione o alla disperazione. Ciò non toglie, tuttavia, che le varie sfumature di tonalità che il pianista può trarre da una nota siano tutte esclusivamente in funzione delle differenti velocità che ani-

mano il martelletto allorchè colpisce le corde. Ora le emozioni umane non seguono corrispondenze così semplici. È cosa certa altresì che il pianista (fosse anche una celebrità) sinchè limita la propria bravura a percuotere note isolatamente non dispone davvero di possibilità maggiori di quante ne abbia un bimbo che strimpella il piano, facendo le prime scale, con una mano sola.

Per togliere ogni dubbio al riguardo, tre scienziati americani, Hart, Fuller e Lusby, dell'Università di Pennsylvania, hanno registrato recentemente alcune curve del suono corrispondenti a note isolate, suonate da celebri pianisti. In pari tempo hanno tracciato analoghe curve delle stesse note ottenute lasciando cadere un peso sui tasti di un pianoforte. Nella tavola IV (fig. 1 e 2) vediamo due coppie delle curve suddette. In ciascuna immagine, la curva posta in alto è la traccia della nota suonata dal gran pianista, quella in basso corrisponde al suono ottenuto lasciando cadere il peso. Risulta chiaramente come non sia possibile rilevare differenza di sorta.

Il primo problema del quale si occupa il fabbricante di pianoforti concerne la corda ed è inteso a far sì che essa emetta un suono che possieda i requisiti voluti. Il secondo problema poi riguarda la trasmissione di questo suono all'orecchio dell'ascoltatore. Un filo metallico ha un diametro talmente piccolo che le sue vibrazioni trasmettono all'aria circostante ben poca energia. Ecco perchè l'arpa dà un suono così debole. Se il pianoforte ne produce uno più nutrito, ciò è dovuto all'ausilio datogli dalla tavola armonica, ampia quanto lo consente la cassa dello strumento. Solidamente fissato alla tavola armonica avvi un ponte (pancone) sul quale passano

le corde del piano; esso trasmette le vibrazioni delle corde alla tavola armonica.

Allorchè quest'ultima riceve le vibrazioni, la sua superficie, ch'è lata, agita e pone in movimento una considerevole massa d'aria, cosicchè il suono verrà udito, con sufficiente intensità, anche a distanza. È importante che tutte le parti della tavola armonica vibrino in fase, altrimenti finiranno col neutralizzarsi a vicenda, come abbiamo spiegato a pag. 66. Occorre perciò che la tavola armonica sia costruita con un legno nel quale il suono si propaga rapidamente. A tale scopo vien di frequente impiegato l'abete di Norvegia nel quale il suono si propaga alla velocità di 3 miglia al secondo. Le vibrazioni sonore percorrono la tavola armonica in tutta la sua lunghezza in 1/2000 di secondo. Cosicchè, per le note basse, le vibrazioni sono press'a poco in fase lungo tutta la tavola, per le note più alte le differenze di fase non sono eccessive.

DEL SUONAR CON L' ARCO

Abbiamo visto che la teoria concernente la percussione o la pizzicata di una corda armonica non presenta difficoltà veruna. Invece quella che si riferisce a una corda, allorchè questa sia soffregata (come nel violino o violoncello) è piuttosto complessa.

Una corda di violino emette la stessa nota sia quando vien pizzicata che quando vien soffregata; ciò dimostra che l'arco deve provocare vibrazioni libere della corda. Desumendolo esclusivamente dai principi generali non l'avremmo potuto sapere giacchè, dato che l'arco fornisce energia in continuazione, avremmo anche potuto credere che avrebbe

costretto la corda a compiere vibrazioni « forzate ». Invece tali vibrazioni forzate sono da escludere a priori perchè la forza esplicata dall'arco sulla corda non ha un periodo proprio ben definito.

Helmoltz riuscì a seguire la vibrazione di una corda di violino durante il moto dell'arco fissandovi un lustrino e prendendo una serie di fotografie istantanee. Un sistema più moderno consiste nel far vibrare la corda dietro a uno spiraglio strettissimo, posto ad angolo retto con la corda. Guardando allo spiraglio si scorge un punto isolato della corda e quando questa vibra, il punto si muove su e giù dietro ad esso. Le fasi singole del moto avvengono in successione troppo rapida perchè l'occhio le possa seguire ma è facile fotografarle. Infatti facendo muovere una lastra fotografica rapidamente e con moto uniforme dietro allo spiraglio, si ottiene un'immagine della corda retrostante a quello.

Helmoltz trovò che si alternano in rapida successione due tipi di movimento. Durante il primo, l'arco fa presa sulla corda in modo che questa, essendo trascinata, è costretta a seguirne il movimento. Questa fase non può durare a lungo giacchè quanto più la corda viene spostata dalla sua posizione normale tanto maggiore dev'essere la forza esercitata per impedirle di balzare addietro. Viene un momento in cui l'arco non riesce più a trattener la corda ed allora ha luogo la seconda fase. La corda balza addietro, lungo l'arco, sino ad oltrepassare d'un buon tratto la posizione normale. A questo momento l'arco la riafferra e il moto, nelle sue fasi, si ripete indefinitamente.

Helmoltz trovò che il moto si compie nel piano in cui l'arco si muove ed ottenne l'immagine del moto di vari punti della corda.

La fig. 38 ci mostra questa immagine per un punto che si trovi a un quarto della lunghezza della corda. I tratti $\overline{AB}$ $\overline{CD}$ $\overline{EF}$ ... rappresentano la fase del movimento allorchè l'arco afferra e trascina con sè la corda; i tratti $\overline{BC}$ $\overline{DE}$... invece, la fase in cui essa sfugge all'indietro e sorpassa per inerzia la sua posizione normale. In questo caso particolare il movimento di rimbalzo occupa un quarto del tempo complessivo. Per altri punti della corda, la frazione di tempo varia ma si mantiene sempre uguale a quella aliquota della sua lunghezza, lungo la quale si deve

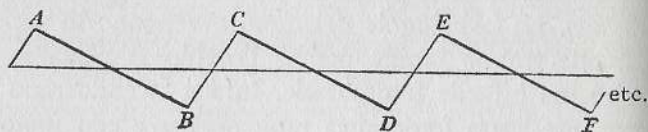



Fig. 38. - Come vibra un punto sulla corda di un violino, sollecitata a un quarto della sua lunghezza, a partir dal ponticello.

scorrere sulla corda per raggiungere il punto sul quale va a poggiare l'arco.

Ogni qualvolta l'arco lascia sfuggire la corda e ogni volta che, al contrario, la riafferra, la vibrazione della corda subisce un improvviso mutamento di fase. Così, nel caso di due violini che suonino contemporaneamente, la differenza di fase delle loro vibrazioni varia di continuo facendo sì che i suoni emessi, a un certo istante, si rinforzino reciprocamente per poi indebolirsi nell'istante successivo. Queste frequenti alternative di intensità provocano i cosiddetti « battimenti », caratteristici delle corde che suonano all'unisono, anche quando le due vibrazioni sono in perfetto accordo.

I dati desumibili dalla fig. 38 ci consentono di analizzare il moto della corda nelle sue armoniche

costituenti. Helmoltz ha trovato che le forze che si esplicano nelle varie armoniche debbono essere sempre nei seguenti rapporti: 1, 1/4, 1/9, 1/16, ecc., a prescindere dal punto sul quale farà presa l'arco.

Ciò implica che quest'ultimo si trovi sempre ad angolo retto con la corda. Suonando con l'arco in qualsivoglia altra direzione, si desteranno vibrazioni longitudinali, accompagnate da quei laceranti cigolii e scricchiolii che son... la delizia del violino dei principianti. E tanto, al riguardo, può bastare.

IL SUONO DEL VIOLINO

Limitando le nostre considerazioni al violino, normalmente suonato, possiamo dire, a proposito dei due fattori che già abbiam visto, che il primo (il fattore posizione) è sempre uguale all'unità, e che il secondo (fattore ordinale) ha lo stesso valore che assume per la corda pizzicata. Qualunque sia il punto della corda ove l'archetto si posa, la 1ª, 3ª, 5ª ed altre armoniche d'ordine dispari si fanno udire con intensità uguale a quella che le suscita allorchè la corda vien sollecitata nel suo punto medio. Invece la 2ª, 4ª, 6ª ed altre armoniche pari, anzichè mancare, si fanno udire intensamente e ciò conferisce alla corda, suonata con l'arco, un suono più nutrito e brillante di quello della corda pizzicata.

Potrà stupire che la tonalità di un violino non dipenda affatto dal punto della corda sollecitata dall'arco. A prima vista, questo fatto può far pensare che anche il violino, come il piano, sia uno strumento al quale manca un'espressione emotiva propria. Giova ricordare, tuttavia, che il suonar la nota di un piano è cosa di un momento: non appena il martelletto ha percosso le corde, l'intero processo

è terminato. Invece il suono della nota di un violino rappresenta un processo continuo. In entrambi i casi è solo l'intensità del suono che può variare, ma siccome nel violino ciò avviene da un istante all'altro, tal fatto conferisce allo strumento nuove ed efficacissime possibilità di espressione.

Si aggiunga che l'arco del violino ha una certa larghezza, elemento questo che Helmoltz trascurò nello studio matematico del fenomeno. Prendendo, invece, in considerazione la larghezza dell'arco, vedremo che il moto della corda, entro certi limiti, è relativamente indipendente dal punto ove l'arco si appoggia, ma non è poi assolutamente tale.

Un archetto di una certa larghezza ha, sul suono del violino, lo stesso effetto che un martelletto ha su quello del piano. Smussa un po' la curva descritta dalla corda e così facendo elimina talune armoniche alte, particolarmente quelle che avrebbero un nodo in qualche punto, sotto all'arco. L'arco si può posare dove vogliamo, in un punto corrispondente da 1/7 a 1/15 della lunghezza effettiva della corda; di solito la frazione suddetta è rappresentata da 1/9 a 1/10 della lunghezza, dal ponticello; più nei « piano », meno nei « forte ». Se l'arco si posa sul ponticello (vale a dire in stretta prossimità ad esso) non si viene a trovare su alcun nodo, salvo quelli delle armoniche relativamente alte. Perciò quest'ultime si udranno con notevole intensità e la nota avrà un suono metallico. Allontanando progressivamente l'arco dal ponticello, le armoniche alte si fanno udir più debolmente e il suono diviene più dolce ed uniforme, adatto quindi per i passaggi « piano ». Quando si suoni « col legno », vale a dire col sostegno dei crini dell'arco, il suono prodotto avrà un timbro metallico, un po' aspro, (e ciò in

qualunque punto della corda) giacchè la larghezza dell'arco non serve più a eliminare le armoniche alte.

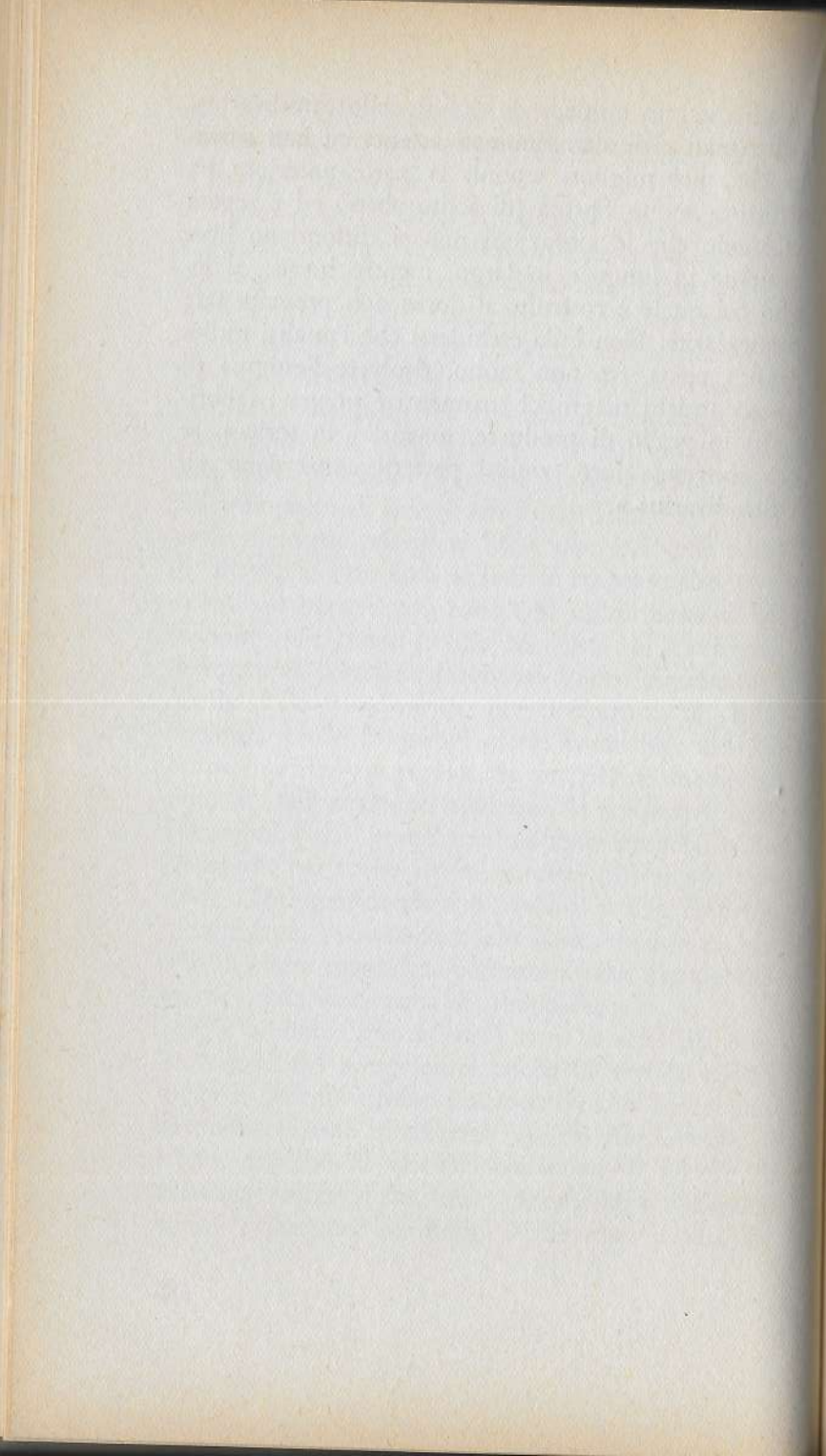
La cassa del violino ha lo stesso scopo della tavola armonica del piano; le vengon trasmesse le vibrazioni della corda ed essa le magnifica spostando un volume d'aria maggiore di quanto non potrebbero fare le sole corde. Vi è, peraltro, una differenza essenziale e rilevante fra questa cassa armonica e la tavola del pianoforte. Quest'ultima serve soltanto a *trasmettere* le vibrazioni delle corde; sarà più o meno buona a seconda della fedeltà con la quale assolve il suo compito. Il corpo del violino, invece, deve non solo trasmettere le vibrazioni delle corde, ma aggiungervi bensì qualcosa di suo. Dato che le vibrazioni che gli son proprie sono piuttosto acute e che buona parte di esse ha la stessa frequenza delle armoniche delle note prodotte dalle corde, si comprende come queste ultime possano, sovente, essere rinforzate considerevolmente per risonanza. È appunto la presenza di queste vibrazioni libere e proprie della cassa che dà al violino quel timbro che gli è particolare. Questo gruppo di frequenze è noto col nome di « zona formativa ».

Molti violini hanno un gruppo di vibrazioni libere le cui frequenze oscillano fra i 3000 e i 6000 periodi e, se il violino ha una voce così calda, espressiva e colorita lo si deve al fatto che le armoniche dei suoni emessi dalle corde, essendo dotate di frequenze comprese fra i limiti suddetti, vengono magnificate, per risonanza, da queste vibrazioni. Quelle invece della viola hanno frequenze minori, giacchè lo strumento è più grande. Ciò spiega perchè una nota bassa del violino abbia un suono diverso dalla stessa nota emessa dalla viola. La cassa armo-

nica del violino rinforza un gruppo di armoniche piuttosto alte; quella della viola ne rinforza uno di armoniche più basse.

È meno facile, tuttavia, spiegare perchè la stessa nota, suonata su due violini di diversa fattura, cioè, uno buono e uno cattivo, diano due suoni così diversi. Dopo lunghe discussioni è risultato che, anche in questo caso, gran parte della diversità va attribuita a differenza di frequenza nella « zona formativa ». Backhaus ha studiato la frequenza delle vibrazioni della cassa armonica di un violino Stradivarius di primissimo ordine ed ha trovato che la maggior parte di queste vibrazioni hanno frequenze uniformemente comprese fra i 3200 e i 5200 periodi. In violini non così perfetti le frequenze sono, di solito, più basse e non sono così uniformemente distribuite. Un buon violino moderno, al confronto, dimostra di possedere frequenze che si avvicinano a quelle dello Stradivarius, per uniformità di distribuzione, ma le frequenze stesse erano inferiori alle prime di circa 500 periodi. In un violino mediocrissimo, di fabbricazione moderna, le frequenze delle vibrazioni libere erano non soltanto irregolarmente distribuite ma erano altresì inferiori di ben 1000 periodi. Ciò significa che un violino cattivo rinforza, casualmente, alcune armoniche basse, mentre un violino di classe magnifica potremmo dire « imparzialmente » una vasta zona di armoniche alte.

Si è creduto, sino a pochi anni fa, che nei celebri violini dei tempi aurei anche la vernice contribuisse a dare un timbro morbido e ricco. Invece studi recenti hanno dimostrato che ciò non è vero. Il legno, anzichè la vernice, costituisce il fattore di massima importanza. Lark, Horovitz e Caldwell hanno esaminato, coi Raggi X, le casse armoniche

di un discreto numero di violini dello Stradivarius, dell'Amati e di altri rinomati artefici ed han trovato che, nei migliori violini, la parte anteriore ha struttura molto fibrosa (di solito abete) ed è segata in modo che le vibrazioni non si diffondano liberamente in lungo e in largo, mentre invece, il legno col quale è costruito il dorso non presenta tale particolarità. Non è da escludersi che l'analisi radiografica possa, fra non molto, risolvere l'enigma di questi antichi magnifici strumenti e ponga i fabbricanti in grado di produrre, magari « in serie », se ciò convenga loro, violini perfetti come sono gli « Stradivarius ».

CAPITOLO QUARTO

LE VIBRAZIONI DELL'ARIA

Abbiamo dedicato gli ultimi due capitoli alle vibrazioni dei diapason e delle corde armoniche. Quelle dei diapason ci hanno offerto un interesse quasi puramente teorico ed hanno valso a farci comprendere il processo vibratorio e il tracciato di una sinusoide o curva del suono. D'altra parte, discutendo le vibrazioni delle corde, abbiamo esaminato alcuni problemi musicali in pratica; abbiamo considerato i suoni prodotti da un violino, da un'arpa, da un pianoforte e così via. Tratteremo, nel presente capitolo, un altro gruppo di strumenti musicali, nei quali il mezzo che vibra è una colonna di aria. Vogliamo alludere quindi alle canne d'organo, ai flauti, ai fischietti, agli oboe, pifferi, ecc.

LA MOLLA D' ARIA

Ci varremo, per primo esperimento, di un apparecchio quanto mai semplice: si tratta di una comune pompa per gonfiare i pneumatici delle biciclette o quelli delle automobili. Sia essa provvista di un pistone a buona tenuta d'aria e, per servire al nostro esperimento, noi provvederemo anche a tappare ermeticamente l'apertura inferiore che serve, di

regola, all'immissione dell'aria nel pneumatico. Dopodichè porteremo la pompa in posizione verticale, col pistone al sommo del suo percorso verso l'alto, come si vede in fig. 39.

Il pistone, naturalmente, non scende subito verso il fondo del cilindro, giacchè la pressione, all'interno di quest'ultimo lo sorregge. Proviamo a spingerlo, esercitando una certa pressione sulla manopola, ma, nell'istante in cui abbandoniamo quest'ultima, il pistone rimbalza, quasichè l'aria, all'interno del

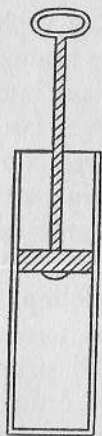



Fig. 39. - La forza della « molla d'aria », come si manifesta in una comune pompa da bicicletta (chiusa a un estremo). Spingendo verso il fondo il pistone, questo viene respinto vivacemente verso l'alto, come se nel cilindro vi fosse una molla vera e propria.

cilindro, fungesse da molla. Ecco ciò che Roberto Boyle chiamava « molla d'aria ».

Ci porremo in grado di comprendere il funzionamento di questa « molla d'aria » qualora riflettiamo che un qualunque gas è formato da un numero pressochè infinito di molecole in continuo movimento, animate ciascuna da grande velocità. Le molecole si muovono su tratti rettilinei di spazio, sintanto che non vengono a collidere con una loro simile o urtino contro le pareti del recipiente che contiene il gas. Quando ciò avviene, la molecola bal-

za in altra direzione e si pone su differente percorso.

Quanto più grandi sono le molecole, tanto più si urteranno l'una con l'altra, cosicchè è possibile misurare le loro dimensioni accertando con qual frequenza avvengono le collisioni. Rileviamo altresì che le loro dimensioni variano moltissimo: le sostanze più semplici hanno le molecole più piccole e ciò appare naturale. La molecola più semplice e più piccola di tutte, quella dell'Elio, che consta di un solo atomo, ha un diametro di circa millimetri 0,00000025. Quella dell'idrogeno, consta di due atomi ed è un po' meno piccola della precedente. Quella dell'aria è ancora meno piccola. Le molecole del vapore acqueo (H_2O) e del biossido di Carbonio (CO_2), ognuna delle quali contiene tre atomi, hanno un diametro di circa mm. 0,0000005.

Data la loro estrema piccolezza anche la più minuta particella di materia contiene un enorme numero di questi infinitesimi. Una gocciolina d'acqua ne contiene, ad esempio, milioni di milioni di milioni. Se le molecole che compongono l'aria d'una stanza fossero poste una accanto all'altra, formerebbero una catena lunga tanto da fare l'intiero giro della terra 25.000 milioni di volte; se le stesse molecole venissero uniformemente distribuite sulla superficie terrestre ne toccherebbe 2000 milioni per ogni centimetro quadrato.

La velocità media delle molecole d'aria in una stanza comune è di circa 450 metri al secondo; press'a poco la velocità di una pallottola da fucile. La pressione atmosferica è dovuta appunto a questo bombardamento. Ogni respiro introduce milioni e milioni di molecole nei nostri polmoni e se il nostro torace resta gonfio e non si svuota, ciò è dovuto all'incessante bombardamento che esse esercitano con-

tro le pareti dei nostri organi respiratori. Allo stesso modo il pistone nel cilindro di una locomotiva subisce il bombardamento delle molecole di vapor acqueo e queste sono in numero ingente: $1,04 \times 10^{29}$ al secondo; per quanto il peso complessivo delle molecole, nel cilindro, sia di poche decine di grammi, pure la spinta esercitata contro il fondo dello stantuffo è tale da spinger questo in avanti e far correre un treno che pesa centinaia di tonnellate.

Ci sarà facile adesso comprendere quanto avviene allorchè spingiamo, nel cilindro, il pistone di una pompa da bicicletta. Comprimendo le molecole d'aria le forziamo ad avvicinarsi l'una all'altra. Come risultato avremo un considerevole aumento nel numero di quelle che urtano il fondo del pistone e quindi un corrispondente aumento di pressione. È appunto quest'ultimo fatto che costituisce la cosidetta « molla d'aria ».

LE VIBRAZIONI DI UNA COLONNA D' ARIA

Data l'analogia che essa presenta con una molla metallica, una colonna d'aria è atta a compiere vibrazioni proprie di data frequenza. Soffiando sull'estremo (aperto) di un tubo o di un cilindro cavo, udremo una nota musicale, la cui altezza corrisponde alla frequenza della vibrazione che si desta nell'aria, all'interno del tubo. O anche: poniamo un diapason, in vibrazione, a pochi millimetri dal bordo di una grossa provetta di vetro (o altro recipiente analogo). Versiamo frattanto dell'acqua nel vaso: allorchè questa ha raggiunto un certo volume ci perverrà, chiaro e vivace, il suono del diapason, mostrandoci così che la colonna d'aria, sovrastante al-

l'acqua, ha una vibrazione libera della stessa frequenza del diapason.

Il mezzo migliore per studiare le vibrazioni libere di una colonna d'aria consiste tuttavia in un processo che ha molti punti di contatto con l'esperimento di Melde che abbiam già visto. Quello ci pose in grado di rivelare le vibrazioni libere di una corda tesa; questo varrà invece a farci rintracciar le vibrazioni proprie di una colonna d'aria. Prendia-

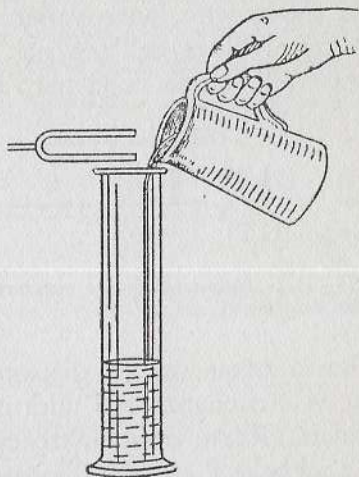



Fig. 40. - Quando il diapason emette la propria nota, con particolare sonorità, vuol dire che vi è risonanza fra le sue vibrazioni e quelle della colonna d'aria del cilindro.

mo dunque un cilindro cavo, chiuso alle due estremità, mediante due occlusioni scorrevoli. Poniamolo a giacere orizzontalmente, come vedesi in fig. 41. Il disco di chiusura *S,* a un estremo, aderisce esattamente alle pareti interne del cilindro, l'altro *T,* invece, non è a perfetta tenuta e si sposta facilmente, in un senso o nell'altro, con la mano. Quest'ultimo esperimento è quasi identico a quello con la pompa, solo che il cilindro è in posizione orizzontale. Anche con questo apparecchio dobbiamo esercitare

una certa forza per spingere verso l'interno il disco *T;* se poi lo abbandoniamo, la molla d'aria nel cilindro lo respingerà verso l'esterno. Il disco perciò oscillerà avanti e indietro per un certo tempo, proprio come se vi fosse realmente una molla metallica posta fra *S* e *T*.

Per rilevare le frequenze delle vibrazioni libere della colonna d'aria, fissiamo un rebbio del diapason in vibrazione al disco di chiusura mobile *T* e spostiamo frattanto il disco *S* avanti e indietro. Questi spostamenti fanno variare la frequenza delle vibrazioni libere dell'aria nel cilindro, e, sia pure a intervalli, prima l'una poi l'altra verrà a coincidere

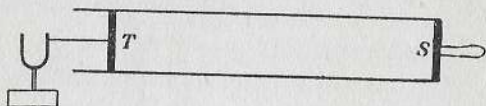



Fig. 41. - Apparecchio per saggiare le vibrazioni prodotte da una colonna d'aria.

con la frequenza del diapason. Allorchè ciò avviene vi è risonanza e si udrà una nota risuonare ben chiara. Rileveremo inoltre che la risonanza avviene allorchè il tratto *ST* assume determinati valori e che questi son tutti multipli di una stessa lunghezza. Per esempio, se la distanza minima alla quale avviene la risonanza è 30 centimetri, le altre saranno 60, 90, 120... cm., cioè un multiplo della prima. Ciò sino ai limiti imposti dalla lunghezza del cilindro (1).

(1) Il modo migliore per effettuare tale esperimento (noto col nome di esperimento di Kundt) consiste nel dare al diapason la forma di sbarretta allungata. Le vibrazioni longitudinali sono, in tal caso, molto più acute di quelle di un diapason comune e perciò sarà sufficiente un cilindro di minor lunghezza. - N. d. T.

Comprenderemo il significato di questo principio, sostituendo il nostro cilindro con uno di vetro (purchè perfettamente asciutto all'interno) nel quale si sia sparsa una qualunque polvere fine come cipria e di color chiaro (per esempio: del licopodio). Allorchè il diapason vibra, le particelle minutissime di polvere rivelano l'agitazione dell'aria turbinando e riempiendo quindi il tubo. Quando il disco *S* giunge in una posizione favorevole alla risonanza, ce ne accorgiamo perchè il turbinio entro gran parte del tubo divien più vivace. Vi sono però dei brevi tratti nei quali la polvere cessa di turbinare e finisce per depositarsi in sottili straterelli. Nell'esempio da-

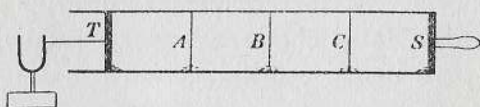



Fig. 42. - Ponendo della polvere nell'apparecchio della figura precedente, vedremo che essa si deposita in mucchietti, in determinati punti a uguali distanze fra loro. Tali punti sono quindi i nodi della vibrazione.

to precedentemente, rileveremmo che a queste zone di calma corrispondono le distanze sopradette di cm. 30, 60, 90, 120 dal disco *T* e siccome il tratto *ST* è un multiplo di 30 cm., l'ultimo straterello di polvere si troverà appoggiato contro il disco *S* (vedi fig. 42).

È facile comprendere cos'è avvenuto. Dato che la polvere si deposita, vuol dire che in quelle regioni non vi è turbinio d'aria. Queste zone corrispondono quindi ai « nodi » della vibrazione. In altre parole, le aliquote della colonna d'aria *TA, AB, BC* in figura 42 devono vibrar separatamente, allo stesso modo che la corda tesa vibrava in tratti uguali e

distinti (1). Concludiamo che le vibrazioni libere di una colonna d'aria sono in tutto analoghe a quelle d'una corda tesa; la colonna infatti si suddivide in un numero qualsivoglia di parti, ognuna delle quali vibra.

Avremmo potuto anche effettuare l'esperimento rendendo inamovibili il disco di chiusura *S* e quindi costante la lunghezza della colonna d'aria. Ponendo varii diapason all'altro estremo saremmo riusciti a individuare le varie frequenze delle sue vibrazioni libere. Avremmo così trovato che queste frequenze consistono in una fondamentale più le armoniche, di frequenza 2, 3, 4... volte la prima. La vibrazione che ha una frequenza quadrupla della fondamentale fa sì che la colonna si suddivida in quattro parti uguali e distinte, ciascuna delle quali vibra.

Da una serie di esperimenti del genere troveremo che la frequenza di ogni vibrazione è esattamente proporzionale alla lunghezza della colonna d'aria che vibra. Questa legge corrisponde a quella di Pitagora e va interpretata allo stesso modo. Infatti, come avviene per la corda tesa, le vibrazioni di una colonna d'aria constano di una serie di onde che si diffondono da *T* a *S* e vengono poi riflesse addietro, sino ad *S*. La legge stessa aggiunge che le onde sono animate tutte dalla stessa velocità.

(1) Può apparire illogico che la zona T sia un nodo, pensando che il disco che vi oscilla vicino mantiene l'aria in agitazione. Il fatto si spiega qualora si rifletta che il disco ha un peso molto maggiore di quello del volume totale d'aria nel tubo, cosicchè basta un moto anche minimo del disco per trasmettere all'aria energia sufficiente a mantenersi in violenta agitazione. Perciò l'ampiezza della vibrazione del disco è piccola paragonata a quella delle vibrazioni in altre parti del tubo. In T vi è quindi un nodo, o tale almeno si può considerare, agli effetti pratici. - N. d. T.

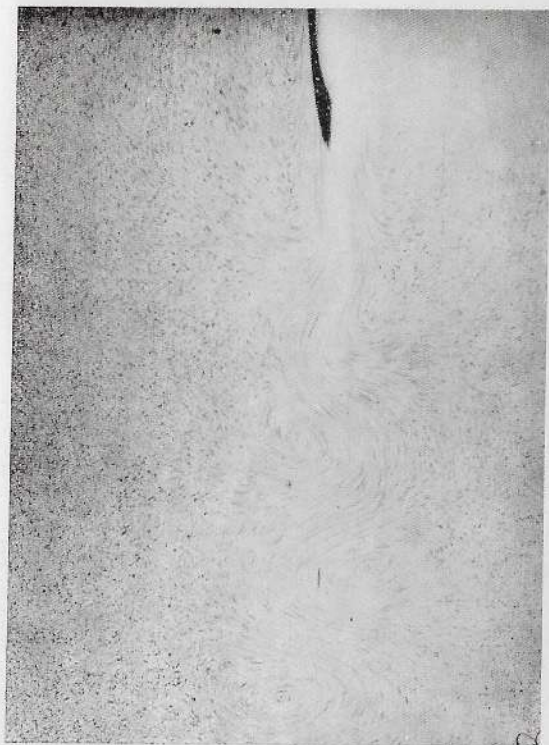
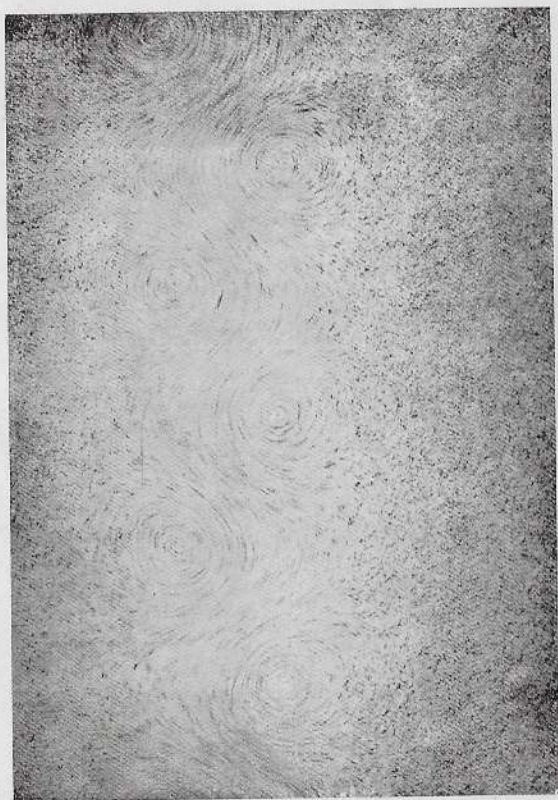
Tavola V

Vortici ottenuti traendo un ostacolo alla superficie di uno specchio d'acqua.
(I moti vorticosi son resi visibili aggiungendo all'acqua dell'alcole e del latte).

Tavola VI

Gli stessi vortici della tavola precedente, a maggior distanza dal corpo che li ha prodotti.

(La formazione dei vortici avviene ora regolarmente. È evidente che essi si formano da entrambi i lati dell'ostacolo, a vicenda).

D'altronde, il fenomeno si comprende meglio ricordando che l'aria nel tubo è formata da un ingente numero di molecole dotate tutte di grande velocità. Supponiamo quindi che, quando il rebbio del diapason inizia il movimento vibratorio, esso spinga, in un primo tempo, il disco *T* verso l'interno del tubo. Così facendo, comprime l'aria nello strato *TT'*, che si trova nelle immediate vicinanze di *T*. Per ciò vien accresciuta la forza del bombardamento molecolare non solo su *T* ma anche nello strato seguente *T'T''*. Sino a un istante prima della vibrazione, il bombardamento su *T'* si era svolto con pari forze: tante erano state le molecole che si muo-

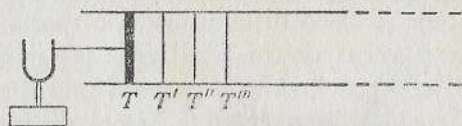



Fig. 43. - **Come si diffonde un'onda attraverso una colonna d'aria**

vevano da destra a sinistra quante quelle da sinistra a destra. Ora invece le cose cambiano. Sarà infatti molto maggiore il numero delle molecole che incrociano *T'* da sinistra, anzichè da destra. Ciò vale a rarefare un po' la congestione nello strato *TT'* ma crea un addensamento nel secondo strato *T'T''*. Un fenomeno analogo avverrà ora in quest'ultimo strato, com'era avvenuto in *TT'* cosicchè la congestione passa ulteriormente al terzo strato *T''T'''*, e così via indefinitamente.

Vediamo quindi che il moto del disco *T* verso l'interno provoca il diffondersi lungo il tubo di un'onda di compressione. Occorrerà un certo tempo perchè ciò avvenga, dato che anche le molecole stesse si muovono con una determinata velocità. Non

appena T comincia a spostarsi verso destra, numerose molecole vengon spinte in avanti e, per così dire, recan novelle di quanto è avvenuto agli strati più lontani, quasi come un esercito in fuga. Le notizie non possono, necessariamente, giunger prima dei messaggeri che le recano, (i messaggeri son le molecole...) e di fatto, i moti non avvengono molto celermente. Le molecole non percorrono tratti rettilinei; esse collidono fra loro, si respingono continuamente e il loro percorso è quindi una linea spezzata. Dato quanto abbiam detto e date anche altre cause, gli esperimenti ci dimostreranno che l'onda di compressione si muove con una velocità che rappresenta il 74% di quella delle molecole.

Dopo che il disco di chiusura si è spostato di un certo tratto verso destra (vedi fig. 43) il diapason inverte il suo movimento e provoca uno spostamento a sinistra del disco. Il moto or ora descritto si ripete, eccetto che l'onda, in questa seconda fase, non è più di compressione bensì di rarefazione. È animata bensì da una velocità uguale a quella della precedente che, ripetiamo, corrisponde al 74% della velocità media delle molecole.

Il ripetersi del movimento destato nel diapason provoca la diffusione di una serie di onde di compressione e di rarefazione nell'aria, onde che son dotate tutte della stessa velocità.

Allorchè una di esse giunge al disco di chiusura, vien riflessa e percorre quindi il tubo in direzione opposta. La composizione di due onde di uguale ampiezza, moventesi in sensi contrari, costituisce una delle vibrazioni libere che abbiamo già considerato. Tale movimento è simile in tutto alla vibrazione di una corda, e precisamente al caso illustrato in fig. 30. La fig. 44, mostra come si di-

stribuisce la densità in quattro tempuscoli successivi. Le frecce indicano la velocità del movimento; le divisioni verticali sono più o meno vicine corrispondentemente alla densità dell'aria (o altro gas) e le fasi si seguono nell'ordine dei numeri ivi segnati: 1, 2, 3, 4; 1, 2, 3, 4...; ecc.

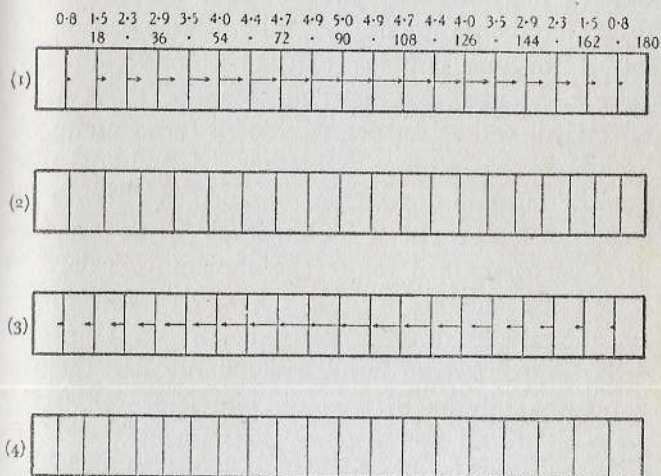



Fig. 44. - Quattro fasi nella vibrazione di una colonna d'aria. Le stanghette verticali rappresentano le particelle d'aria in diverse fasi del movimento. Le frecce indicano la direzione del moto e la loro lunghezza è proporzionale alla velocità di esso. (I numeri nella linea superiore son proporzionati alle lunghezze delle frecce sotto a loro; la seconda linea di numeri rappresenta la differenza di fase fra il punto e l'estremo sinistro).

Se il disco *S* non ostruisse l'estremo più lontano dal diapason, le onde, uscendo dal tubo, si effonderebbero nell'aria circostante e il suono del diapason si udrebbe tutt'attorno. Concludiamo quindi che la trasmissione di un'onda del suono è costituita appunto dall'alterno susseguirsi di fasi di compressione e di rarefazione.

LA VELOCITÀ DEL SUONO

Non è difficile calcolare la velocità alla quale queste onde percorrono il tubo. Nella vibrazione più semplice, l'onda si sposta da *T* sino ad *S* e viceversa, mentre il rebbio compie *mezza* vibrazione. Perciò, durante una vibrazione intera, l'onda percorre 4 volte la lunghezza totale del tubo. Basandosi su tal fatto, troviamo che la velocità dell'onda, in seno all'aria, è circa 342 metri al secondo (1). Avviene talvolta di vedere un pennacchio di fumo uscire dal fischio di una locomotiva lontana: il fischio si udrà qualche secondo dopo. Confrontando la distanza del treno col tempo che il fischio impiega per raggiungerci ritroveremo il valore che abbiamo già dato. A coloro che abitano a circa 3 Km. da Westminster avviene talvolta di udire alla radio di casa il rintocco della campana detta familiarmente Big Ben mentre, dopo una diecina di secondi, giungerà loro, attraverso all'aria, il suono stesso, direttamente.

Per quanto la velocità del suono sia grande, paragonata ad altri valori che essa ha nel campo della vita, non è fra i valori massimi. È infatti solo il doppio della velocità di un aeroplano o di un'automobile. Osservando un reggimento di soldati marciare al suono della banda, avremo una dimostrazione visiva della velocità relativa del suono. Ogni volta che un soldato ode una battuta di musica pone il piede a terra e, così facendo, accompagna il movimento con un lieve abbassar del capo. Però avvie-

(1) Il testo porta: « la velocità dell'onda sonora è circa 1100 piedi al secondo ». Essendo il piede (inglese) equivalente a metri 0,32484, il valore quì riportato, è assai minore di quello segnalato dall'originale inglese; corrisponde al valore dato usualmente nei testi di Fisica. - N. d. T.

ne che i vari soldati non odano le varie battute contemporaneamente, giacchè il suono impiega un certo tempo a percorrere la colonna d'uomini in tutta la sua lunghezza. Vedremo perciò un'onda di teste che si abbassano, percorrere tutta la truppa man mano che il suono si diffonde, così come vediamo curvarsi le spighe di grano in un campo allorchè spira il vento. Il reclinar delle spighe sta a indicare la velocità del vento e così il piegar del capo dei soldati, lungo la colonna, ci mostra la velocità del suono.

Il fatto che la velocità del suono è limitata, è causa di complicazioni quando si esegua musica. In una grande orchestra può avvenire che due strumenti siano a 15 metri di distanza, l'uno dall'altro; in un organo di grandi dimensioni, due tastiere possono aver le loro canne distanti, anch'esse, 15 metri l'una dall'altra. Dato che il suono impiega circa 1/20 di secondo a percorrere 15 metri, due suoni possono venir prodotti simultaneamente e pure un ascoltatore può udirne uno 1/20 di secondo più tardi dell'altro.

Ora nell'esecuzione della musica 1/20 di secondo rappresenta una quantità di tempo che può influire, in determinate circostanze. Per esempio: dando a 1/4 la frequenza 152 (♩= 152), 1/20 di secondo rappresenta la durata di 1/32 (𝅘𝅥𝅰), e, suonando, basta restare addietro di tanto per far sì che un trillo o un passaggio rapido diventi un insieme di suoni confusi e discordi. Per tale ragione occorrerebbe, in orchestra, porre gli strumenti che devon suonare assieme, più vicini che possibile e l'organista, prima di accoppiar due tastiere le cui canne son distanti l'una dall'altra, dovrebbe pensarci bene.

Entro determinati limiti di intensità la velocità di trasmissione del suono è costante per suoni più o meno forti. Certi rumori di gran violenza, come un'esplosione e il colpo delle armi da fuoco, si diffondono con velocità maggiore di quanto non avvenga per i suoni musicali, ma di ciò non possiamo occuparci nella presente trattazione. La velocità dei suoni musicali è pure costante; indipendentemente dall'acutezza loro e, udendo musica che ci giunga da lontano, le varie note ci giungono precisamente nell'ordine in cui sono state suonate. Così, ad esempio, un accordo resta un accordo e non si trasforma in un arpeggio, come avverrebbe se le note di differente altezza avessero tendenza ad anticipare o a ritardare sulle note di acutezza media.

Si tratta di due fatti che assumono, in musica, una grande importanza. Se infatti le note, a seconda della loro intensità e del loro diapason, dovessero giungerci prima o dopo le altre, la musica tutta quanta si trasformerebbe in una Babele, prima di giungerci all'orecchio.

VELOCITÀ DEL SUONO NEI VARI GAS

Ripetendo l'esperimento descritto a pag. 142 riempiendo però il cilindro con un gas che non sia l'aria (per esempio: gas illuminante) troveremo che la velocità del suono assume un valore diverso dal precedente. Lo stesso dicasi per l'aria calda. Riportiamo, nella seguente tabella, alcuni valori assunti dalla velocità del suono in vari gas.

Ripensando che un gas è una congèrie di molecole che si muovono rapidamente in ogni senso, è facile comprendere il perchè della diversa velocità del suono nei vari gas. Infatti la velocità delle sin-

gole molecole varia da gas a gas. Una legge generale della fisica asserisce che le molecole pesanti si muovono più lentamente di quelle leggere cosicchè il suono si trasmette meno celermente in un gas pesante che in uno leggero e lo mostra la seguente tabella. Essa ci dice altresì che il suono si diffonde più rapidamente in un gas caldo che in uno freddo e non è difficile comprenderne il motivo. Per riscaldare un gas, infatti, occorre fornirgli un incremento di energia. Questa energia addizionale si suddivide uniformemente, per tutte le molecole e fa si che ognuna di esse aumenti la propria velocità. Perciò anche il suono, che di esse si vale, si diffonderà più celermente. Nell'aria comune la velocità molecolare aumenta circa dell'uno per cento ogni 4 gradi C° (circa) di aumento della temperatura.

Nome del gas	Velocità del suono
Aria secca a 0 centigradi	m. 353 circa al secondo
» » » 15 »	» 363 » » »
» » » 100 »	» 418 » » »
Idrogeno » 15 »	» 1410 » » »
Biossido di Carbonio a 15 centigradi	» 276 » » »

Il fatto che la velocità del suono varia in funzione della temperatura, porta conseguenze di notevole importanza pratica. Abbiamo già visto che la frequenza della vibrazione di una colonna d'aria è proporzionale al tempo che il suono impiega a percorrere la lunghezza della colonna stessa. Se l'aria è riscaldata, il suono si trasmette più celermente e la frequenza diminuisce. Da ciò consegue che il diapason degli strumenti a fiato divien più alto col riscaldarsi della temperatura oppure quando gli stru-

menti vengano, da un ambiente più freddo, condotti in uno più caldo. Ciò spiega perchè occorra accordare gli strumenti orchestrali ogni volta che cambi la temperatura. Prima di un'esecuzione, l'accordatura avviene nella stessa sala da concerto e ciò perchè gli strumenti siano intonati l'uno con l'altro nel luogo stesso ove verranno suonati. Per la stessa causa i suonatori di strumenti a fiato, soffiano nei loro strumenti prima di accordarli.

E, finalmente, il variar di velocità del suono a seconda del gas percorso ci offre un efficace mezzo per rivelare la presenza del « gas delle miniere » nell'aria delle gallerie sotterranee di carbon fossile. Il grisou esplode quando venga a contatto con una fiamma scoperta. Per l'esame dell'aria nelle miniere si provoca il suono simultaneo di due fischi all'interno della galleria, entro due tubi, di una certa lunghezza, uno dei quali sia stato previamente riempito d'aria pura tolta da un recipiente metallico che serve da campione, l'altro con l'aria della miniera la cui purezza è dubbia. Se questa contiene grisou in forte quantità, il suono percorrerà i due tubi a diversa velocità. Le vibrazioni delle due colonne di aria saranno di differente frequenza e si udranno dei battimenti. Il numero di questi ultimi, al secondo, è indice del grado di impurità dell'aria.

RIFRAZIONE DEL SUONO

È proprietà generale del moto ondulatorio che le onde, attraversando un mezzo uniforme, seguano un percorso rettilineo; allorchè il mezzo non è uniforme esse vengono riflesse o rifratte, allo stesso modo che un raggio di luce si rifrange passando dall'aria all'acqua. La rifrazione tende sempre ad una

sorta di allontanamento dalla sostanza nella quale la velocità del moto è maggiore così come, quando una colonna di soldati gira radialmente attorno a un dato centro, l'uomo che è in testa alla colonna, tende, per forza centrifuga, a scostarsi dalla direzione di marcia. Supponiamo quindi di avere uno strato di aria fredda a contatto col suolo e uno d'aria calda superiormente. La velocità di percorso è maggiore nello strato più alto e perciò avremo che, quando il suono, dopo aver attraversato quello inferiore, giunge allo strato superiore, vien riflesso verso il più basso e può, anzi, esser ricondotto ad esso e ivi proseguire il suo cammino.

Condizioni queste che si producono spesso su un lago o altro specchio d'acqua tranquilla, sopratutto al mattino presto quando le acque del lago sono ancora piuttosto fredde. Se una persona, in barca, canta o parla, dapprima il suono si diffonderà in ogni direzione ma, non appena le onde sonore giungono allo strato superiore, esse vengono riflesse verso il basso e proseguiranno il loro tragitto lungo l'acqua. Quindi non vien dispersa energia alcuna pel fatto che le onde si diffondono verso l'alto e perciò la voce, o il canto, potranno essere uditi a distanza molto maggiore di quanto, in altre condizioni, non avvenga.

Altrettanto avviene, benchè in scala ancor più vasta, in regioni collinose o montagne, dove la voce può esser udita a distanze che appaiono straordinarie inquantochè il suono piuttosto che attraversar le valli, rasenterà il suolo.

Ancor su maggior scala, le stesse condizioni si presentano nell'atmosfera, considerata come un tutto organico. L'atmosfera terrestre consta di uno strato inferiore, detto « troposfera » e di uno, più alto,

detto « stratosfera ». Quest'ultima è molto più calda della seconda cosicchè, quando un suono parte dal basso, solo una parte minima di esso perviene alla stratosfera; la massima parte, essendo riflessa, ritorna sulla terra. Un'esplosione o altro fragore può talvolta venir percepito dall'udito umano ed a grandissime distanze, per mezzo di onde sonore che vengon riflesse, verso la terra, dalla stratosfera che è più calda.

Quando il vento è più forte negli strati alti dell'atmosfera che in quelli vicini a terra, possono presentarsi condizioni analoghe a quelle già accennate. Supponiamo che, in prossimità del suolo, spiri un vento da occidente alla velocità di 6 metri al secondo; negli strati superiori soffi invece alla velocità di 12 metri. Un suono emesso in prossimità del suolo percorrerà lo spazio alla velocità di m. 330 al secondo, mentre l'aria stessa che lo trasmette, si muove alla velocità di 6 metri. Perciò il suono si effonderà verso oriente con la velocità di m. 336 al secondo quando sia rasente al suolo e di m. 340 quando sia più in alto. Anche in questo caso il suono verrà respinto dallo strato di maggior velocità di percorso (lo strato superiore) e dovrà perciò rasentar la terra e potrà esser udito a grandi distanze.

Per un suono che si effonda verso occidente avviene il contrario. Infatti la velocità di percorso è di m. 324 al secondo, rasente al suolo e m. 318 negli strati più alti. Il suono vien continuamente riflesso dalla superficie terrestre e può non esser più udito a breve distanza (a occidente) dalla sua origine. Ecco perchè spesso sembra che il suono si disperda nel vento e perchè è difficile « gridare al vento »...

LA MUSICA E LE VIBRAZIONI NELL' ARIA

Una colonna d'aria è simile a una corda tesa inquantochè le sue vibrazioni hanno frequenze che stanno fra loro nei rapporti semplici: 1/2, 2/3, 3/4, 4/5; in ogni caso le armoniche sono « armoniche naturali » e quindi una causa qualsivoglia che provochi il suono della nota fondamentale provocherà pure un'abbondante emissione di armoniche.

Questa proprietà ci spiega la particolare importanza della corda tesa e della colonna d'aria quali fonti di suoni; allorchè i due mezzi vibrano in continuità le loro armoniche alte, essendo « naturali » si fanno udire e, date appunto l'abbondanza e l'accordo loro, il suono prodotto sarà musicalmente ricco.

Abbiamo visto anche che altri mezzi non possiedono questa proprietà; per esempio: la frequenza delle vibrazioni libere del tamburo, dei piatti e del triangolo non stanno, fra loro, in rapporto semplice e perciò, le loro armoniche non sono « armoniche naturali ».

Per tale motivo sarebbe difficile far si che le loro note alte suonassero a lungo e, anche in tal caso, si tratterebbe di suoni discordi. Per concludere diremo che si tratta di suoni che devono risuonare solo per brevi istanti. Ecco dunque perchè il complesso dei vari strumenti orchestrali vien suddiviso in tre gruppi: a corda, a fiato e a percussione. È poi interessante rilevare che i gruppi suddetti corrispondono esattamente alla corda dell'arco, alla canna spezzata, al tamburo ed al suono di legni percossi che, per primi, a quanto si dice, destarono nell'uomo primitivo il senso musicale. Possiamo cominciare a comprendere perchè tutti gli strumenti musicali d'og-

gidì han tratto origini esclusivamente da questi tre tipi originarii e perchè, malgrado il ripetersi di ricerche e di tentativi non si sia riusciti a costituire categorie nuove.

Il fenomeno delle vibrazioni libere, di frequenza uguale a quella delle armoniche naturali, costituisce una caratteristica propria dell'aria in un tubo chiuso ai suoi due estremi. Purtroppo, per suscitare queste vibrazioni occorre lasciar adito all'aria esterna, aprendo l'uno o l'altro estremo. Perciò il suono non è più perfetto, per una ragione che esporremo brevemente. Se il diametro del tubo è molto piccolo in confronto alla lunghezza, il suono sarà migliorato ma in piccola misura. Le vibrazioni saranno tuttora simili a quelle di una corda tesa. Ecco perchè i registri dell'organo corrispondenti ai suoni degli strumenti a corda son costituiti da canne molto sottili. Nel caso invece, più frequente, di canne a diametro più largo, vi sarà una certa deficienza di armoniche alte e ciò spiega perchè, per le canne d'organo di diametro superiore, occorra disporre una serie di canne più piccole, allo scopo di fornire direttamente le armoniche mancanti.

Una discussione particolareggiata del problema è possibile soltanto quando si sia compreso come vengono originate le vibrazioni di una colonna d'aria. Prendiamo quindi in esame tale argomento.

MOTI VORTICOSI

Esaminando il fluire dell'acqua nel letto d'un torrente cosparso di rocce e pietre, rileveremo facilmente il diverso comportamento del corso d'acqua prima e dopo l'incontro con la roccia. Il torrente, nel tratto antecedente all'ostacolo, fluisce uniforme-

mente; invece dopo si formano numerosi gorghi e mulinelli che ne alterano la superficie prima piana e levigata. Un fenomeno simile ci appare quando una barca o una nave si muovono alla superficie di acque tranquille. Di fronte alla prua lo specchio dell'acqua è immutato; a poppa ci appare un vorticoso ribollir di gorghi. L'aspetto superficiale è simile a quello del corso d'acqua che ha incontrato la roccia ferma; arreca infatti poca differenza che l'acqua si

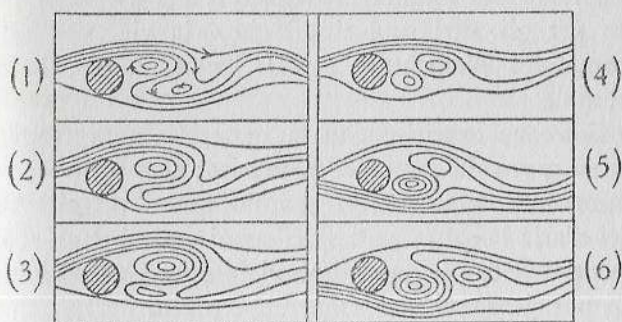



Fig. 45. - Vortici provocati dallo scorrere che fa l'acqua attorno a un filo metallico.

muova attorno a un oggetto fermo o che un oggetto si muova fendendo una superficie tranquilla.

Le fotografie pubblicate nelle tavole V e VI ci mostrano i gorghi che si formano dietro a un corpo che fenda uno specchio d'acqua tranquilla. Vediamo, dapprima i filetti e i vorticelli subito dopo l'ostacolo (tavola V), poi quelli più distanti, sempre dietro (tavola VI). La fig. 45 mostra una serie di gorghi formatisi nell'acqua, attorno a un filo metallico trascinato in seno ad essa. È chiaro rilevare, da tutte le immagini suaccennate, che i vortici si formano ai due lati del filo metallico, successivamente.

Fenomeni analoghi avvengono in seno all'aria, per quanto non sia così facile osservarli. Quando il vento o un soffio d'aria incontra un ostacolo di lieve entità si formano piccoli gorghi, che corrispondono precisamente a quelli formatisi nell'acqua in seguito alla presenza di una roccia. Davanti a questo, avremo un flusso costante d'aria, dietro invece un treno di vorticelli. Si avvicendano essi ai due lati dell'ostacolo; non appena formatosi, il primo vien trascinato più lontano nel flusso d'aria e così fa posto per gli altri suoi simili che, via via, si vanno formando. Nella tavola VII, ne vediamo alcuni esempi.

Potrebbe apparire che la materia finora trattata avesse poco da fare con la musica; siamo invece in argomento, giacchè son proprio questi piccoli vortici d'aria la causa prima dei suoni emessi dagli strumenti a fiato. Se questi non vi fossero, i nostri flauti e i nostri organi non suonerebbero più.

QUANDO « FISCHIA IL VENTO »

Allorchè il vento, soffiando attorno a un ostacolo qualunque, genera dei piccoli vortici, questi, nascendo, dànno un lieve urto sia all'ostacolo che all'aria, nelle immediate vicinanze. Se il vento soffia uniformemente, questi urti si susseguono a intervalli assolutamente regolari. Si udrà allora una nota musicale, nota alla quale accennano gli scrittori quando parlano del: « fischiare o ulular del vento ». L'altezza del così detto fischio è determinata, naturalmente, dalla frequenza con la quale si ripetono gli urti e questa, a sua volta, corrisponde al numero dei vortici che si formano al secondo. Esperimenti all'uopo condotti mostrano che si forma un vortice ogni

volta che il vento scorre a una distanza che sia uguale a cinque volte e 2/5 il diametro dell'ostacolo, e ciò permette di calcolare l'altezza della nota. Supponiamo pertanto di essere sul mare e che il vento soffi a quaranta miglia all'ora, attraverso a una attrezzatura di corde di circa mezzo pollice di diametro. Un semplice conteggio aritmetico dimostra che 40 miglia all'ora corrispondono a 704 pollici al secondo, cosicchè il vento traversa 1408 diametri di corda al secondo. Dividendo questo valore per 5 2/5, otteniamo 261 che è la frequenza del « fischio del vento »: il do dell'ottava media del pianoforte. Quando invece « ulula il vento », l'altezza della nota sale e scende e la frequenza, all'istante, corrisponde alla velocità istantanea del vento. Più piccoli sono gli ostacoli che il vento incontra sul suo cammino, più alto è il diapason del fischio, perciò udiamo una nota piuttosto alta quando il vento soffia, in campagna, sui fili telegrafici. Più acuto sarà il suono quando si tratti di steli di grano o fili d'erba.

Ogni vorticello dà un urto non solo all'aria, ma altresì all'ostacolo che lo ha generato, cosicchè, dato che i gorghi si formano a vicenda ai due lati di esso, l'ostacolo subirà un moto oscillatorio, volgendosi da un lato e dall'altro. Son queste spinte che provocano lo sbattere della fune di una bandiera. Quanto allo sventolar della bandiera in cima all'asta, ciò è dovuto al rincorrersi che fanno i vortici d'aria lungo di essa, prima da una banda e poi dall'altra.

I moti suddetti sono, in ogni caso, vibrazioni forzate, inquantochè è il corso del vento che le provoca. L'ostacolo solido avrà anch'esso, naturalmente, le proprie vibrazioni libere e se la frequenza di una di queste coincide con la frequenza della vi-

brazione provocata dal vento, vi sarà risonanza e ne può risultare l'emissione, chiara ed intensa, di una determinata nota. Ecco perchè i fili del telefono, « cantano » più forte del solito quando l'aria, d'inverno, è molto rigida. Il freddo li ha accorciati ed essi sono simili alle corde ben tese di un violino. Le loro vibrazioni hanno assunto una frequenza pari a quella dei vortici del vento.

L'ARPA EOLIA

Son sempre vorticelli di cui abbiamo sinora parlato a produrre il suono dell'arpa Eolia. Si tratta di un certo numero di fili metallici tesi in uno speciale telaio che vien posto attraverso una finestra aperta o in posizione tale da essere esposto a una corrente d'aria piuttosto forte. Soffiandovi contro, questa pone i fili metallici in vibrazione al modo anzidetto e la nota emessa sarà particolarmente chiara e intensa allorchè una delle vibrazioni provocate dal vento coincide, in frequenza con la vibrazione propria del filo metallico. Generalmente le corde dell'arpa Eolia son tutte accordate allo stesso diapason, ma il loro spessore essendo vario, i suoni, provocati dal vento, hanno tutti altezza differente. La corda darà un suono chiaro ed intenso quando il suono che il vento fa vibrare in essa coincide con l'armonica di quella nota alla quale le corde sono intonate. Sinchè il vento si limita a far emettere armoniche inferiori alla 10ª, udremo suoni compresi nella comune scala musicale. Invece la undecima armonica e quelle superiori, provocano note che non vi appartengono e ciò è causa di quel timbro strano e innaturale che ha il suono dell'arpa Eolia.

TAVOLA VII

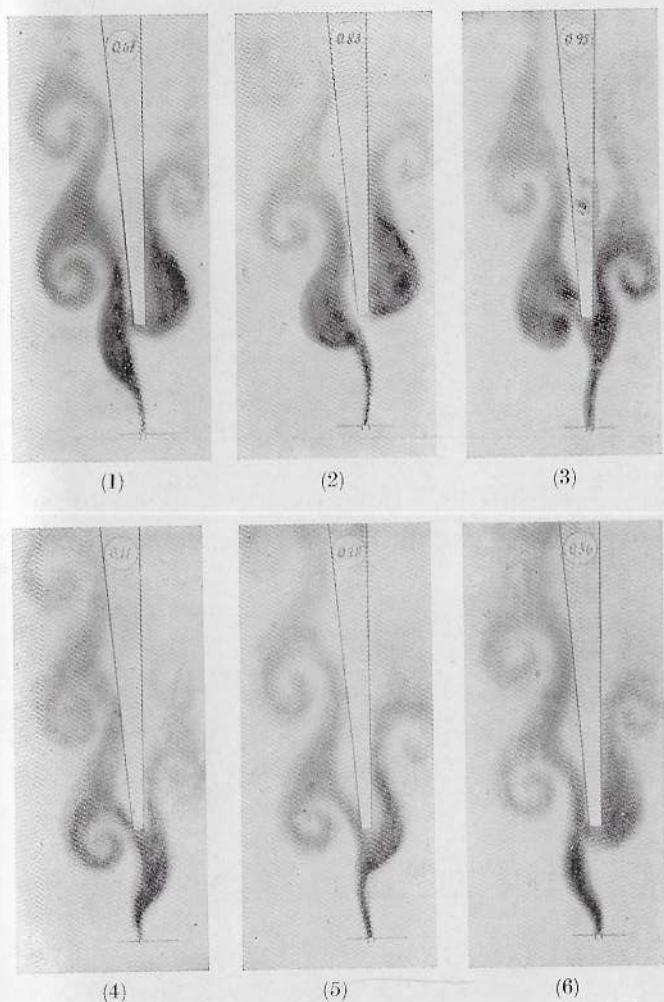



Fig. 1. - Vortici formatisi ai lati di una canna da organo, a labbro. Per render visibili i moti dell'aria, è stato aggiunto ad essa del fumo.

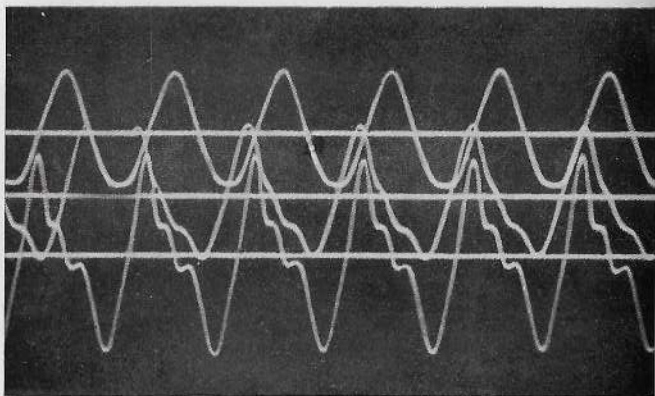



Fig. 1. - Rappresentazione grafica di una nota emessa da un flauto, con varie intensità: piano (superiormente), mezzo-forte (curva media) e forte (inferiormente). La nota è un Si (ott. centr.) di frequenza 488.

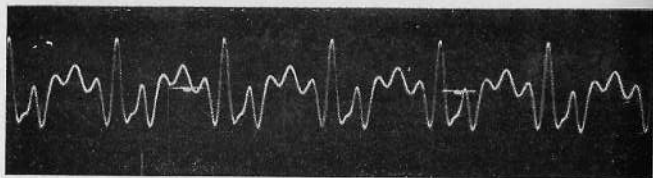



Fig. 2. - Traccia di una nota emessa da un oboe, suonata mezzo-forte. La nota è un Do (ott. centr.) di frequenza 254. Gli intervalli di tempo, segnati con punti bianchi, a mezza altezza della striscia, corrispondono a centesimi di secondo.

FORME DEL SUONO DI FLAUTO E DI OBOE.

SUONI DI TAGLIO

Suoni analoghi ai precedenti si avranno quando un flusso gassoso qualunque urta un bordo tagliente, sia esso metallico o comunque di sostanza molto dura. I fenomeni relativi sono stati accuratamente studiati da Lootens, Hensen, Weerth, Wachsmuth e vari altri. Il procedimento comunemente usato consiste nel riempire un dato recipiente *R* (fig. 46) di aria mantenuta ad una determinata pressione, quindi far sì che un sottile soffio d'aria, sfuggendo dal beccuccio *S*, colpisca frontalmente il bordo tagliente *E* postogli davanti.

Il soffio d'aria, andando a colpire il bordo ta-

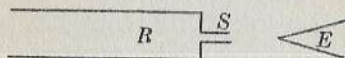



Fig. 46. - Apparecchio per lo studio dei suoni di taglio.

gliente provoca, a un dipresso, le stesse condizioni che accompagnano il soffiar del vento contro un filo del telegrafo o una corda dell'arpa Eolia. Si formano cioè dei piccoli vortici, ai due lati del bordo, a vicenda, e subito scorrono ad angolo per far posto ai vortici successivi. Dato poi che questi moti si producono in successione perfettamente regolare, essi provochereranno l'emissione di una nota musicale di data frequenza detta: « suono di taglio ».

Abbiamo già visto che le note dell'arpa Eolia sono di frequenza proporzionale alla velocità del vento. Nel caso che c'interessa la velocità del soffio d'aria sostituisce quella del vento e si comprende facilmente come essa vada diminuendo man mano che

ci si allontana dal beccuccio. Perciò l'altezza di un « suono di taglio » dipende dalla distanza del bordo tagliente dall'orificio dell'aria. Se, nell'istante in cui vien proiettato da questo, il getto d'aria si sparge a ventaglio, si comprende che la velocità in *E* sia inversamente proporzionale alla distanza *SE*. Wachsmuth ha verificato infatti che è proprio questo il caso, però entro certi limiti. Rimuovendo gradualmente il bordo tagliente *E* dal beccuccio, la nota calerà, durante un certo intervallo di tempo, e ciò in conformità alla legge suddetta. Però quando la distanza *SE* raggiunge un certo valore critico, il diapason stesso, invece di calare ulteriormente, salta su di un'ottava.

In tal caso, uno studio particolareggiato dei vortici dimostra che ciascuno di essi si è suddiviso in due, dato che un solo vortice non era più lungo abbastanza per giungere dal beccuccio al bordo tagliente.

I vortici, ora, si vanno formando con frequenza doppia di quanto prima non avvenisse. Perciò anche la frequenza della nota di taglio raddoppia e la sua altezza sale di un'ottava.

Dopodichè si verifica ancora una volta la legge della distanza inversa, quindi la nota sale ancora: questa volta per tutto l'intervallo di una quinta, giungendo così alla dodicesima o terza armonica della nota che, in base alla nostra semplice legge, ci saremmo attesi. È chiaro che, perchè ciò avvenga, ciascun vortice si è suddiviso in tre. In seguito avverrà un altro salto ancora; questa volta sino alla quindicesima o sopra-ottava della nota data dalla legge della distanza inversa. Vediamo così che, man mano che la distanza *SE* va aumentando, il nostro suono percorre successivamente le armoniche della no-

ta fondamentale determinata in base a questa semplice legge. Si spiegano questi salti successivi di altezza con la tendenza che hanno i vortici a suddividersi ulteriormente.

Impiegando una serie di risuonatori di Helmoltz potremo facilmente identificare tutti questi varii suoni. Oppure potremo applicare un tubo in prossimità del bordo *E* e osservare che, qualora una delle vibrazioni libere della colonna d'aria nel tubo abbia la medesima frequenza del suono prodotto dal bordo tagliente, ci perverrà la nota propria di quello, e, per risonanza, sarà particolarmente chiara e forte.

CANNE D'ORGANO, A LABBRO

Allorchè una nota ha l'origine suddetta, essa è precisa a quella di una comune canna d'organo a labbro. In questa, beninteso, la colonna d'aria che risuona, l'orificio e il bordo tagliente, son posti in modo da formare una sola struttura; la disposizione risultante si vede nella fig. 47.

L'aria vien mantenuta a pressione costante nella « camera del vento » *W* e, per giungere da questa alla canna, deve attraversare una valvola *V*. Un soffio d'aria passa quindi attraverso alla base della canna *F*, vien raccolto e concentrato da uno spiraglio *S* in un sottile getto che va a colpire il labbro superiore *L*.

A questo punto si formano i vortici, al modo già visto, e provocano quelle rapide variazioni di pressione che son causa dei « suoni di taglio » e destano altresì vibrazioni nella colonna d'aria del tubo. Se il suono emesso dalla lamina è tale da risuonare con una delle vibrazioni libere della colonna d'aria, questa riceverà una certa quantità di energia

e la canna, prontamente, darà un suono. Se, invece, i periodi di vibrazione differiscono molto tra loro, l'energia suddetta si accumulerà lentamente e la canna in conseguenza farà udire il suono dopo un certo tempo.

Generalmente vi è scarsa disposizione alla risonanza fra le note prodotte al bordo della canna e le vibrazioni della colonna d'aria, entro al tubo. I

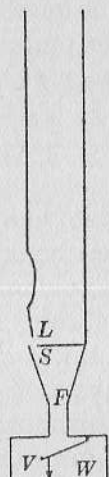



Fig. 47. - Una canna d'organo, a labbro. L'aria, sfuggendo dalla fessura *S* fa pressione sul labbro *L* e produce un suono di taglio. Si determinano così le vibrazioni della colonna d'aria, all'interno della canna.

due elementi suddetti formano un sistema accoppiato e cioè un insieme nel quale ciascuno dei due elementi componenti non può effettuare le proprie vibrazioni libere senza che l'altro intervenga.

Un sistema vien detto a debole accoppiamento allorchè questa dipendenza funzionale è meno sentita e quindi ciascuno dei due mezzi può effettuare le proprie vibrazioni quasi senza che i moti in corso nell'altro le infirmino. In tal caso le vibrazioni libere dell'insieme corrispondono alla somma delle vi-

brazioni proprie di ciascun elemento. Da notarsi, tuttavia, che l'altezza del suono di una delle due parti può venir lievemente spostata dalla presenza dell'altra. Allorchè avviene il contrario il sistema vien detto ad accoppiamento forte.

Nel caso che uno dei due elementi che lo compongono, abbia una massa maggiore dell'altro, le sue vibrazioni, di solito saranno dotate di maggiore energia. L'elemento di massa maggiore « imporrà » le proprie vibrazioni a quello di massa minore e, in definitiva, le vibrazioni libere risultanti, differiranno di ben poco da quelle dell'elemento più forte. Avremo quindi che ciascuna di esse sarà lievemente deviata dalla propria altezza di suono per via dell'elemento più debole.

Un esempio di « sistema accoppiato » ci vien fornito ponendo due orologi a pendolo molto vicini fra loro. Così facendo avverrà che l'uno infirmi il preciso corso dell'altro. Ponendoli agli estremi opposti sulla mensola del camino, ci dànno un esempio di accoppiamento debole; l'influenza reciproca, in tal caso, è quasi insensibile. Entrambi gli orologi andranno bene, indipendentemente (o quasi) dalle piccole irregolarità nel corso dell'uno o dell'altro. Avvicinandoli, invece, renderemo più sensibile e precisa la loro reciproca dipendenza e, finalmente, se li poniamo dorso a dorso, la dipendenza può divenir tanto sensibile da far sì che essi vadano, esattamente a tempo. Se i due orologi sono di ugual forza e di dimensioni pure uguali, verrà esattamente dimezzata quella differenza di tempo che sarebbe interceduta fra loro qualora fossero stati indipendenti. Se poi uno dei due è considerevolmente più forte ed è dotato di massa molto maggiore, finirà per imporre il suo moto all'altro. Il pendolo del più

forte suscita vibrazioni nella propria cassa e questa le trasmette alla cassa del più debole. Ne consegue che le oscillazioni di questo ultimo non saranno più libere ma verranno bensì indotte a seguire le vibrazioni della cassa ove il pendolo è collocato. Perciò l'orologio più debole dovrà seguire il passo del suo maggior compagno ed entrambi segneranno il tempo che il più forte indicherebbe se non vi fosse il più debole.

I suoni di taglio e le vibrazioni della colonna d'aria in un tubo sonoro costituiscono un sistema di oscillazioni accoppiate, del tipo che abbiamo testè descritto. L'energia che anima le vibrazioni anzidette è talmente maggiore di quella insita nel suono di taglio da far sì che si debbano considerare le vibrazioni della colonna d'aria quasi come vibrazioni integrali del sistema. Ciononostante la forza che anima i suoni di taglio non è tale da farli trascurare completamente; di fatto essi esercitano una certa influenza sul suono emesso. Abbiamo visto che il soffiar con maggiore intensità fa sì che il suono di taglio aumenti la propria altezza e ciò influisce pure sull'acutezza della nota emessa dalla canna. Nei flauti, pifferi ed altri strumenti a fiato, i suoni di taglio e le vibrazioni dell'aria sono in dipendenza più stretta cosicchè un suonatore accorto può regolare opportunamente (sia pure entro certi limiti) l'altezza del suono emesso, moderando accortamente il soffio.

La tavola VII mostra alcune immagini, eseguite da Carrière, dei vortici che si formano in prossimità della bocca di una canna d'organo. La canna è posta a destra, in ciascun disegno e le sei immagini sono state eseguite a intervalli, l'una dall'altra, di 1/6 del periodo cosicchè, nel ciclo 1, 2, 3, 4, 5,

6, 1, 2... ecc. possiamo considerare tutti gli intervalli uguali fra loro. Osservando la somiglianza fra queste immagini e quelle che abbiamo visto nelle tavole V e VI ci convinceremo che i suoni di taglio son prodotti, essenzialmente, allo stesso modo dei suoni emessi da una arpa Eolia.

Carrière ha studiato altresì come varia l'altezza dei suoni di taglio in corrispondenza all'altezza della bocca della canna (il tratto *SE* nella figura 46, o *SL* nella figura 47). La tabella seguente contiene i risultati di una serie di esperimenti nei quali la apertura era larga mm. 2,5 e la pressione dell'aria, quella di una colonna d'acqua alta mm. 160.

Altezza della bocca	Frequenza dei suoni di taglio	Prodotto
mm. 81	80	6480
» 89	74	6586
» 99	62	6138
» 109	54	5886
» 119	48	5712
» 129	43	5547
» 139	35	4865
» 149	33	4917
» 159	30	4770
» 16	28	4676

La tabella ci mostra che la frequenza scema man mano che aumenta l'altezza della bocca e, per ora, ciò concorda con la legge che abbiamo già incontrato. D'altronde, le due variazioni non sono esattamente proporzionali, come si rileva dal fatto che il prodotto (ultima colonna) non è costante. Invece, togliendo 40 mm. all'altezza della bocca, otterremo una proporzionalità più precisa e vedremo pure che il prodotto dell'altezza della bocca, così ri-

dotta, per la frequenza, è pressochè costante; quasicchè il getto d'aria percorresse circa 40 millimetri prima di spargersi a ventaglio e perder velocità.

Carrière ha studiato altresì la conseguenza dei mutamenti nella pressione del vento. La tabella qui sotto mostra i risultati ottenuti tenendo il beccuccio di efflusso a una distanza costante di 119 millimetri. Contemporaneamente egli fece variar la pressione fra i valori corrispondenti ai pesi di una colonna d'acqua alta mm. 30, sino a quello di una alta mm. 200.

Pressione (in mm. d'acqua)	Frequenza del suono di taglio
mm. 30	23
» 40	25
» 50	28
» 60	30
» 80	33
» 100	35
» 120	40
» 140	42
» 158	44
» 182	46
» 200	48

Desumiamo dalla tabella che un incremento nella pressione, aumentando la velocità del soffio d'aria, porta un incremento anche alla frequenza del suono di taglio.

Dato che le vibrazioni della colonna d'aria implicano una somma di energia sensibilmente maggiore a quella dei suoni di taglio, esse finiscono quasi coll'indurre in questi ultimi le frequenze loro proprie. Tuttavia, perchè la canna suoni con prontezza e dia una nota chiara e nutrita, è bene che vi sia la

massima risonanza fra il suono di taglio e la nota di vibrazione libera della colonna d'aria. Per conseguir tale risultato occorre l'abilità di un esperto. Per esempio, se la frequenza della canna è 33 (DO della controttava), le tabelle sopra riportate ci dicono che si può ottenere un suono di taglio in perfetta risonanza con quel DO valendosi di una delle seguenti combinazioni:

Pressione = mm. 80 di acqua; altezza della bocca = mm. 119.

Oppure:

Pressione = mm. 160 di acqua; altezza della bocca = mm. 149.

Ma oltre a queste deve esservi certamente un numero pressochè infinito di altre combinazioni non comprese nelle tabelle suesposte. Qualora la pressione del soffio sia bassa occorrerà, naturalmente, che anche la bocca sia a minore altezza e ciò perchè la velocità del getto non sia troppo diminuita, prima di giungere ad essa.

Le due tabelle che abbiamo riportato suppongono un'apertura di emissione larga mm. 2,5. Aumentando questo valore, salirà piuttosto bruscamente l'altezza del suono di taglio, giacchè un largo getto d'aria serba più a lungo la velocità che lo anima di quanto non faccia un getto sottile. Perciò colpirà il labbro con maggior velocità. Si vede quindi che un abbassamento di pressione può venir compensato da un aumento nella larghezza dell'apertura.

Allorchè la valvola inferiormente alla canna è aperta, il soffio d'aria non raggiunge subito la velocità o pressione massima. Perciò una canna che sia stata disposta in modo da essere in piena risonanza allorchè la pressione abbia conseguito il suo valore massimo, non sarà di solito in buona risonanza men-

tre la pressione sta assumendo il valore suo proprio. Avviene spesso, nel corso di questo intervallo, di udire suoni di taglio totalmente diversi dalla nota propria della canna: a volte l'ottava o la dodicesima e, talvolta, un suono ancor più alto, simile a un pigolio, consistente, probabilmente, nelle armoniche alte del suono di taglio più basso prodotto dal valore infimo della pressione. Alcuni antichi costruttori di organi, in Europa, si compiacevan quasi di favorire l'emissione di questo suono, forse perchè non sapevano come fare a eliminarlo. Il fabbricante moderno si adopra invece a sopprimerlo e si vale, per far ciò, di una serie di piccole intaccature e nicchiette praticate con la lima nella linguetta della canna. Ciò aumenta la larghezza effettiva della fessura in quei punti nei quali esse sono intagliate e fa si che il soffio d'aria sia più intenso, a compensare la deficienza di pressione. Si ottiene con ciò di provocare, quasi sin dall'inizio, quel preciso suono di taglio che occorre per provocare la risonanza. Il suono può esser talmente pronto da far si che non si odan più le note di taglio discordi.

CANNE APERTE E CHIUSE

Vi sono canne d'organo aperte e chiuse. Nella canna chiusa, l'estremo più lontano dalla bocca è ermeticamente chiuso. Dato che in questo punto non vi può essere movimento alcuno d'aria, avremo quivi un nodo; la bocca invece, ove non possono aver luogo variazioni di pressioni, è un ventre.

Quindi, all'interno di una canna chiusa a un estremo, l'aria può vibrare soltanto nei modi rappresentati in fig. 48.

Nel primo modo di vibrazione la lunghezza d'on-

da è quadrupla della lunghezza della canna. Ciò dà la nota fondamentale della canna. Nel secondo la lunghezza d'onda è solo un terzo di quella della nota fondamentale cosicchè la frequenza è tripla di

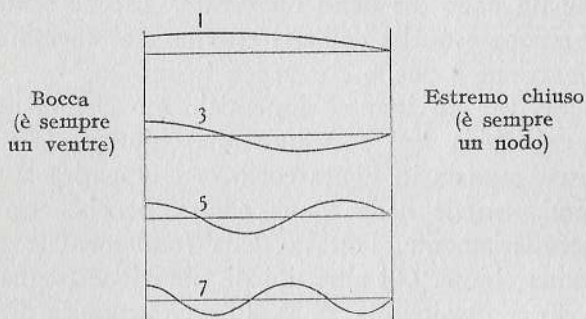



Fig. 48. - Vibrazioni, all'interno d'una canna d'organo, chiusa. Lo spostamento, di ciascun punto, è rappresentato dalla distanza che intercede fra la curva più marcata e il tratto orizzontale, vicino ad essa.

quella di quest'ultima e la nota emessa sarà quindi la terza armonica della fondamentale. Gli altri tipi di vibrazione emettono la 5ª, la 7ª, la 9ª armonica e così via.

Se ora noi tagliamo la parete di chiusura della

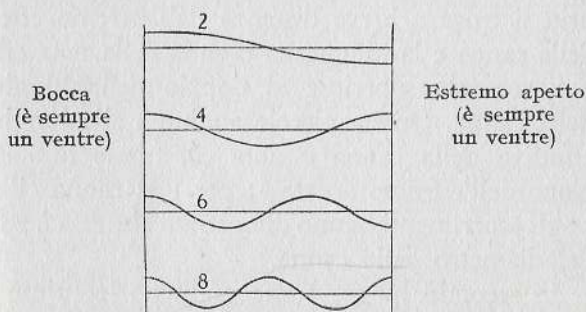



Fig. 49. - Come vibra una canna da orgtano, aperta.

canna, constateremo che questa emette solo le armoniche pari, giacchè quelle dispari scompaiono non appena la chiusura vien tolta. La causa del fenomeno è che l'estremo aperto della canna non è ormai più un nodo ma bensì un ventre, giacchè ormai la pressione è quella dell'aria esterna. Lo schema della vibrazione è quello che vedesi in fig. 49.

Se, per un istante, dimentichiamo che la nostra canna abbia mai posseduto una chiusura, la vibrazione segnata in figura col n. 2 ci apparirà la nota fondamentale della canna aperta, benchè essa sia, necessariamente, l'ottava della fondamentale della canna chiusa. Gli altri tipi di vibrazione (segnati 4, 6, 8) ci appaiono la 2ª, 3ª, 4ª, ecc. armonica di questa nuova nota fondamentale. La canna emette dunque tutte quante le armoniche della propria nota fondamentale.

Ciò, tuttavia, è solo in parte vero. Anzitutto, l'estremo aperto di una canna non è, rigorosamente parlando, un ventre vero e proprio; occorre spostarsi di un breve tratto oltre l'estremo aperto per eliminare del tutto l'influenza modificatrice della canna e trovare una pressione assolutamente uguale a quella dell'aria libera. Perciò il ventre vero e proprio si trova a breve distanza dall'estremo effettivo della canna e la lunghezza d'onda della nota emessa è lievemente superiore al doppio della lunghezza della canna. Questa piccola aggiunta alla lunghezza effettiva della canna è nota col nome di « correzione dell'estremo aperto »; per una canna cilindrica gli esperimenti hanno dimostrato che essa è 29/100 del diametro della canna.

In secondo luogo, è ancora meno legittimo considerare la bocca di una canna, alla stregua di un ventre; occorre quindi apportare una « correzione

alla bocca » ancor più considerevole. In base ai computi di Cavaillé-Coll, la correzione totale da fare è di circa una volta e 2/3 il diametro, per una canna cilindrica, sia essa aperta o chiusa. Per una canna a sezione quadrangolare (aperta e chiusa) la correzione è di due volte la profondità interna. Avremo così che una canna aperta lunga m. 2,40 e larga cm. 15 (diapason) dà una nota fondamentale la cui lunghezza d'onda è di m. 5,30, mentre una canna di legno, chiusa, lunga m. 1,20 e profonda cm. 15 (bordone) emette una nota fondamentale la cui lunghezza d'onda è di circa m. 6.

In modo analogo a quanto abbiam visto a proposito dell'esperimento descritto a pag. 143, la colonna d'aria, in una canna del genere, è capace di vibrare in qualunque numero di tratti separati; tuttavia le correzioni anzidette introducono una complicazione non indifferente. Riteniamo più agevole ricorrere ad un esempio numerico per fornire una spiegazione. Supponiamo quindi che l'aria, all'interno di una canna, abbia una vibrazione fondamentale di frequenza 100. Allorchè quest'aria stessa vibra in due tratti separati, le vibrazioni singole non avranno ciascuna una frequenza 200; come effettivamente avrebbero se non vi fossero le correzioni della bocca e dell'estremo aperto. Le correzioni, infatti, non sono le stesse sia per la nota fondamentale che per le vibrazioni più rapide, cosicchè, queste, anzichè di 200 periodi, possono aver frequenze, poniamo di 202 periodi. Quindi, la canna, in complesso, può esser dotata di frequenze pari a 100, 202, 305 e simili. Il fatto che l'accoppiamento è forte può far sì che il suono di taglio si accordi con la nota fondamentale e ciò varrà ad esercitare, sull'aria della canna, una forza che si ripeterà 100 volte al

secondo. Il teorema di Fourier dice che tale fenomeno può esser considerato alla stregua di un certo numero di forze, ricorrente, quale moto armonico semplice, alla frequenza di 100, 200, 300... volte al secondo, rispettivamente. Perciò, quegli elementi che possiamo considerare le armoniche superiori del suono di taglio, non saranno in perfetta risonanza con le corrispondenti armoniche alte dell'aria nella canna. Può darsi quindi che queste ultime siano pressochè impercettibili all'udito.

Dato che questa parziale scomparsa delle armoniche alte è una conseguenza delle correzioni da apportare alla canna, il loro attenuarsi o cessare affatto dipende dal valore più o meno grande delle correzioni. Nelle canne di diametro molto ristretto, le correzioni sono talmente lievi da essere addirittura insignificanti; quindi le armoniche alte vengono udite copiosamente. Per tali ragioni, i registri a suono di corda dell'organo (la viola da orchestra, la viola da gamba, ecc.) nei quali le armoniche alte devono esser predominanti, constano di canne di diametro assai piccolo. Per contro, i registri a suono di flauto, dai quali quelle devono essere esenti, corrispondono invece a canne di largo diametro. Vi sono, tuttavia, altri mezzi intesi ad escludere le armoniche alte. L'antico organo germanico detto « Spitzflote » era formato da canne di piccolo diametro, però considerevolmente appuntite. La correzione dell'estremo aperto diventava con ciò piuttosto sensibile dato che la conicità della canna la rendeva quasi simile (sotto vari riguardi) a una che avesse un estremo chiuso. Anche il flauto Boemo, quale usasi nelle orchestre, si vale dello stesso artificio: la parte interna della canna termina a cono. L'analisi acustica dimostra che le note appartenenti ai registri

più alti di questo strumento constano di note quasi pure, prive di armoniche, come d'altronde è comprensibile quando si consideri che tanto il diametro quanto la lunghezza della colonna d'aria che vibra sono dello stesso ordine di grandezza.

Aggiungeremo d'altronde che altri fattori presiedono alla misura nella quale le varie armoniche entrano a far parte della nota emessa da una qualunque canna, sia essa chiusa o aperta; fra essi citeremo la pressione del getto d'aria, l'altezza e la conformazione della bocca della canna. Il costruttore di organi può aumentare la velocità del getto d'aria sul labbro della canna e con ciò alzare il diapason del suono di taglio, qualora aumenti la pressione dell'aria di emissione oppure abbassi la bocca della canna. Potrà altresì affilare il labbro superiore della canna, riducendone con ciò la resistenza al getto d'aria. Con l'uno o l'altro mezzo, naturalmente, si accresce l'intensità delle armoniche alte; portando all'estremo il processo, la nota fondamentale può anche scomparire del tutto, cosicchè una canna aperta suonerà l'ottava e una canna chiusa la sua terza armonica, la dodicesima. In linea di massima se la bocca della canna è bassa le note saranno ricche di armoniche, qualora la canna sia aperta; se questa invece è chiusa abbonderanno le armoniche d'ordine dispari. Sopratutto in certi organi (Quintaten, Quintadena e altri) si trovano registri corrispondenti a canne chiuse con le quali si è cercato di ottenere la terza armonica (dodicesima). Del pari, vi sono registri corrispondenti a canne aperte con le quali la ottava è sviluppata al massimo. Vi sono canne aperte (canne armoniche) aventi un forellino a metà della lunghezza in modo che tale punto divenga un ventre. La canna suona essenzialmente in ottava e

la nota fondamentale vien percepita, dall'udito, quasi come un debole brontolio. Vi sono anche canne armoniche chiuse (Zauberflöte = Flauto magico), nelle quali vien praticato un forellino quasi a metà della lunghezza (usualmente a 9/16) sopra la bocca. Anche in tal caso sparisce la nota fondamentale e la canna emette la dodicesima.

D'altronde una canna che sia dotata di bocca piuttosto alta e di un labbro superiore poco tagliente, può essere indotta ad emettere una nota dalla quale le armoniche più alte manchino quasi del tutto: è il suono del flauto.

CANNE D'ORGANO A LINGUETTA

Le canne delle quali ci siamo sino ad ora occupati emettono il suono in modo del tutto analogo al flauto ed al quartino da orchestra, vale a dire per mezzo di una colonna d'aria posta in vibrazione mediante un suono di taglio. L'organo contiene pure altre canne nelle quali l'emissione del suono avviene come nel clarinetto o nell'oboe da orchestra e cioè provvede una speciale linguetta, all'interno della canna, a porre in vibrazione la colonna d'aria.
La linguetta è simile a quella di un'armonium comune. Consiste cioè in una molletta metallica fissata solidamente, a un suo estremo *A* (fig. 50) ed ha una figura tale da conformarsi esattamente in un'apertura praticata in un pezzo rigido di metallo, posto a metà; una camera del vento inferiore (fig. 50) *W* e un'altra cavità analoga, superiormente collegata, *C*. Traendo il debito registro dell'armonium, la camera *W* si riempirà di aria a pressione che si diffonderà attorno alla laminetta, nella camera superiore *C*. Su questa, in alto, si trova una

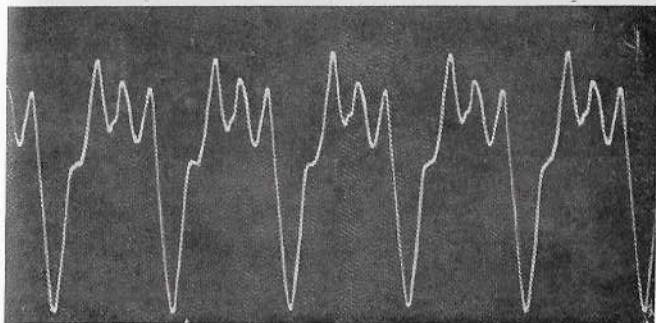



Fig. 1. - Forma del suono di un sassofono. La nota è un Sol diesis di frequenza 209.

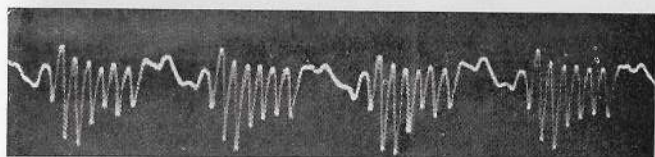
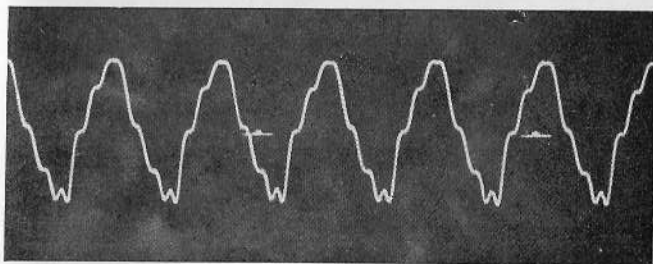
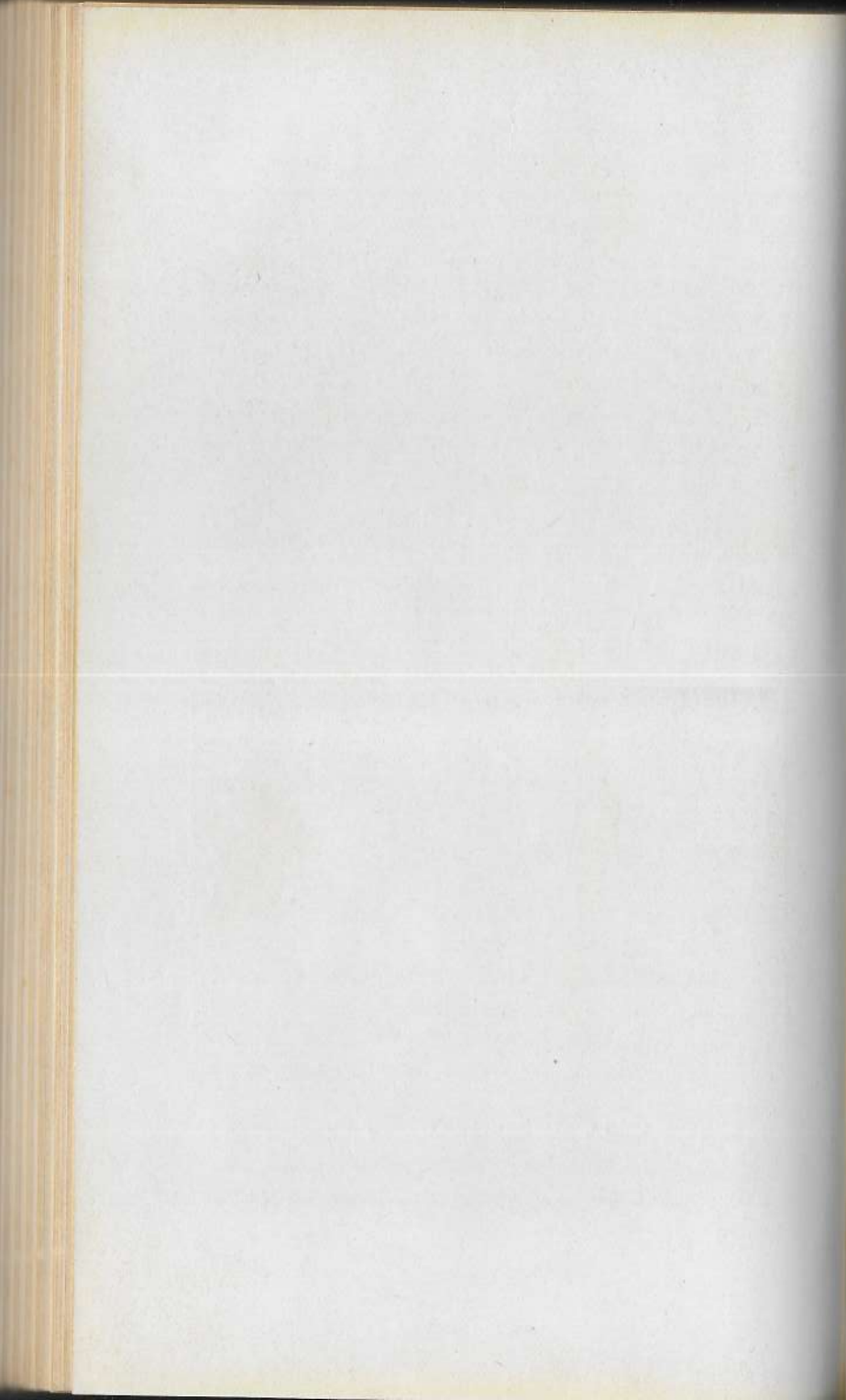



Fig. 2. - Forme del suono corrispondenti a un Do (ott. centr.), emesso da due diversi clarini.

Forme del suono di sassofono e di clarino.

seconda apertura, occlusa, di solito, da un blocchetto di legno *D* provvisto di feltro. Premendo il tasto corrispondente dell'armonium, il blocchetto *D* si solleva e da *C* sfugge dell'aria compressa. Dato poi che la laminetta si trova ad avere maggior pressione d'aria sotto che non sopra, verrà sollecitata verso l'alto e l'aria le fluirà rapidamente attorno, trasferendosi dalla camera *W* alla camera *C*. Prima che la pressione si sia pareggiata, nelle sue canne, l'elasticità della laminetta l'avrà ricondotta nella sua posizione normale così da impedire l'ulteriore flusso d'aria e da far aumentare la pressione in *W*. Il pro-

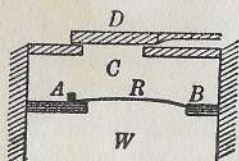



Fig. 50. - Linguetta d'un armonium.

cesso si ripete, la laminetta vien posta in vibrazione vivacissima, con frequenza uguale a quella della sua vibrazione propria.

La lamina di una canna d'organo differisce da quella or ora descritta, inquantochè, essendo troppo grande per adattarsi entro l'apertura del metallo, vi giace invece contro, colpendola, volta a volta. È chiamata perciò « lamina a percussione » mentre quella dell'armonio vien denominata « lamina libera ». Per essere precisi diremo che la valvola che determina il giuoco della lamina, non si trova sopra ad essa, (come in fig. 50) bensì entro la camera *W*.

Questa disposizione lascia libera la porzione più lontana della lamina; vien perciò posta qui una canna di tale forma e lunghezza che la sua frequenza

coincida, a un dipresso, con quella della lamina. Allorchè questa sia posta in vibrazione, l'aria nella canna, entrando in risonanza, vibrerà essa pure ed emetterà una nota limpida e chiara.

È proprio a quest'ultima canna di risonanza che si deve la differenza essenziale fra il tono dell'armonium e quello dell'organo.

In entrambi gli strumenti le lamine hanno una loro vibrazione propria più varie altre, di solito in disaccordo con la prima, come quasi sempre avviene nei mezzi sonori metallici. Allorchè l'armonium suona, tutte queste note si odono assieme e producono un rumore discorde. Nell'organo poi, la massima parte del suono non è dovuta alla lamina bensì all'aria nella canna. Quest'ultima è in risonanza soltanto con la vibrazione principale della lamina cosicchè rinforza soltanto questa vibrazione. Quanto, in definitiva udiamo, è la vibrazione suaccennata sommata alle armoniche della canna. Se quest'ultima ha una forma adeguata queste note formeranno un accordo.

Ellis ha studiato il problema da un punto di vista matematico, allo scopo di individuare in quale misura verranno udite le varie armoniche. Egli è giunto così al risultato che nelle canne cilindriche vengon rinforzate per risonanza soltanto le armoniche d'ordine dispari; ciò spiega perchè le canne del « clarino » nell'organo, come pure gli strumenti a fiato da orchestra abbiano forma cilindrica. Una canna che termina a cono, d'altronde, non possiede tale proprietà selettiva e rinforza del pari le armoniche pari e quelle dispari. Perciò le canne d'organo corrispondenti all'oboe, alla tromba, al corno ecc., e i tubi di questi ultimi strumenti hanno forma conica. Quando si desideri che la nota possieda

un timbro brillante, la vibrazione stessa della lamina dovrà esser ricca di armoniche alte, che la risonanza poi magnificherà. Per tale motivo il fabbricante di organi preferisce una lamina « a percussione » piuttosto che una lamina libera, da armonium, giacchè l'improvvisa interruzione del getto d'aria provoca appunto le armoniche alte richieste. Negli antichi organi, tale interruzione era talmente repentina da far sì che i suoni parziali acuti sovrabbondavano dando al suono un timbro aspro e metallico. Il fabbricante d'organi dei nostri giorni preferisce di curvar la lamina al suo estremo, in modo tale che essa non debba tagliare il getto d'aria repentinamente ma piuttosto volgersi attorno e tagliare gradualmente il soffio d'aria. Con ciò i suoni parziali alti son meno sentiti e il tono generale sarà meno aspro e metallico.

Fig. 51. - La canna a linguetta d'un organo. A destra vedasi la canna intiera, a sinistra una sezione dell'estremo inferiore, contenente la linguetta.

Coloro che, fra i primi, si occuparon del fenomeno, asserirono che il suono di taglio era prodotto dalle vibrazioni di « una lamina d'aria ». Per quanto ulteriori considerazioni abbiano portato a scartar questa ipotesi, certo si è che la formazione di vortici d'aria da un lato e dall'altro del labbro, hanno, a un dipresso, lo stesso effetto del moto alterno della lamina.

Nella canna, questi vortici e l'aria formano un sistema a coppia. Nella canna a linguetta, la coppia è formata dalla colonna d'aria e dalla lamina. La colonna ha la funzione predominante ma, siccome tale importanza non è così marcata come nella canna semplice, un qualsiasi mutamento di frequenza della vibrazione laminare si fa sentire sull'altezza della nota emessa dalla canna. Ciò è tanto vero che le canne a linguetta vengon di solito accordate, modificando la frequenza della vibrazione libera della lamina.

Abbiamo già visto che ogni variazione di temperatura altera la velocità del suono nell'aria, in modo sensibile (circa cm. 33 al secondo o anche 1/1000 della velocità per ogni grado Fahrenheit). Tale variazione tuttavia, influisce poco o nulla sia sulle dimensioni che sull'elasticità del legno o del metallo. Perciò, variando la temperatura, possiamo trascurare quasi completamente ogni eventuale cambiamento prodottosi tanto sulle dimensioni delle canne e dei risuonatori quanto sulla grandezza della linguetta e sulla relativa elasticità. Invece quello che varia considerevolmente è la colonna d'aria in ciascuna canna; inoltre la frequenza della corrispondente vibrazione varierà nell'identico rapporto della velocità del suono. Per esempio: un aumento di 30 F° aumenterà la frequenza del 3% e ciò alza il diapason di un mezzo tono. Il diapason delle canne d'organo a labbro aumenta, in tutte, di circa lo stesso valore, perciò esse restano accordate, l'una con l'altra; caso mai la variazione di temperatura si farà sentire sulle canne più piccole.

I risuonatori delle canne ad ancia variano allo stesso modo; senonchè, dato che le linguette non

subiscon conseguenza alcuna pel mutamento di temperatura, esse finiscon per far scemare, complessivamente, la frequenza della canna e lo strumento, quindi, risulterà in disaccordo.

Qualora vi sia un aumento uniforme di temperatura che interessi lo strumento in ogni sua parte, le canne si manterranno in accordo reciprocamente e, dato che esse ne costituiscono la parte preponderante, colui che suona potrebbe pensare che lo strumento è rimasto accordato, eccezion fatta per le ance che sembrano essersi improvvisamente indebolite.

Ciononostante, se le canne si trovano ad essere in posizione tale, nell'organo stesso, da essere esposte a differenti temperature, avverrà che anch'esse manifestino disaccordo fra loro. È per tale motivo che, dopo l'uso dello strumento, i mantici verranno lasciati aperti acciocchè l'organo venga a trovarsi a temperatura uniforme per la prossima esecuzione. Infatti l'aria tenuta chiusa in un mantice non può seguire le variazioni dell'aria esterna.

STRUMENTI A FIATO DA ORCHESTRA

Per quanto riguarda il metodo del loro funzionamento, gli strumenti a fiato, in pratica, son tutti simili o all'uno o all'altro tipo di canne da organo or ora descritte, cosicchè sarebbe superfluo descrivere in particolare il loro modo di azione. Appare tuttavia utile esaminare una questione d'indole generale.

I fabbricanti d'organo, di solito, specificano la precisa natura del metallo o del legno che compone le loro canne, dato che la qualità del suono emesso

dipende essenzialmente dalla sostanza con la quale la canna è composta. Per esempio: le canne di legno emettono suoni forse più gravi ma certo più caldi e pastosi di quanto non avvenga con quelle di metallo. D'altra parte, le canne di puro stagno posseggono un timbro più ricco di quelle fuse in lega o metallo più a buon mercato. Ciò è ancor più vero quando si tratti di strumenti orchestrali; un clarino d'argento dà un suono molto più « bello » di uno di legno, allo stesso modo che un flauto da orchestra emette suoni che, necessariamente, un piffero da quattro soldi non può produrre.

Qualora i suoni fossero dovuti esclusivamente alle vibrazioni di una colonna d'aria, non potrebbero sorgere « diversità » del tipo descritto; qualunque fosse la sostanza usata per il « recipiente » l'aria vibrerebbe allo stesso modo. Invece se ci è dato di avvertire differenze di timbri vuol dire che la canna stessa deve contribuire, sia pure in parte, all'emissione del suono. Indubbiamente la canna possiede le sue vibrazioni libere; le cui frequenze dipendono dalla sostanza ond'è costituita. Ne consegue, quindi, che di queste vibrazioni alcune vengon rinforzate per risuonanza, con quelle della colonna d'aria.

È noto che il suono si diffonde molto più rapidamente attraverso ai solidi che non attraverso all'aria. Così, per esempio, abbiamo:

Velocità	del	suono	nell'aria	m.	330	al secondo
»	»	»	nel piombo	»	1230	» »
»	»	»	nello stagno	»	2490	» »
»	»	»	nella quercia	»	4200	» »
»	»	»	nell'abete di Norvegia	»	4800	» »

Perciò una canna di legno o di metallo sarà dotata, in generale, di vibrazioni di frequenza ben più alta di quelle possedute dalla colonna d'aria che es-

sa contiene. Se poi le vibrazioni della canna sono in risonanza con una qualche armonica dell'aria, queste ultime saranno armoniche piuttosto alte. Perciò le vibrazioni libere della canna costituiscono una specie di zona formativa, analoga a quella già descritta per il violino.

Negli strumenti a fiato da orchestra, uno stesso tubo vien usato per produrre suoni di altezze ben diverse; ma l'insieme delle vibrazioni proprie della canna, che dipende esclusivamente dalla particolare struttura di essa, resta invariato. Quest'insieme è fattore essenziale del timbro caratteristico dello strumento: taluni scrittori di argomenti musicali giungono ad asserire che il timbro dello strumento è totalmente dovuto a quello.

Lo schema della fig. 52, tracciato in base agli esperimenti di Hermann-Goldap, ci mostra alcune « zone formative » e precisamente quelle che si odono durante il suono di determinati strumenti. La estensione delle note fondamentali è rappresentata dal tratto marcato a sinistra, quella della zona formativa dal tratto punteggiato a destra. I numeri che figurano su quest'ultimo corrispondono all'intensità delle note della zona formativa, misurata alla stregua della nota fondamentale; questa aumenta man mano che percorriamo lo schema verso il basso: è minima per il clarino e il flauto, massima per la tromba e l'oboe.

La presenza di queste armoniche alte è resa manifesta nelle sinusoidi tracciate per ciascun strumento di cui si parla. Figurano nelle tavole VIII e IX alcune fotografie prese dal prof. Dayton Miller. Esse mostrano le « forme del suono » caratteristiche per le note del flauto, dell'oboe, del sassofono e

del clarinetto, strumenti tutti suonati con varie intensità.

L'immagine N. 1 sulla tavola VIII mostra la forma della nota SI (ott. centr.) suonata col flauto, piano, mezzoforte e forte. La curva superiore, ottenuta suonando piano ha l'aspetto d'una sinusoide pressochè pura e mostra che la nota fondamentale è predominante. La curva di mezzo, ottenuta suo-

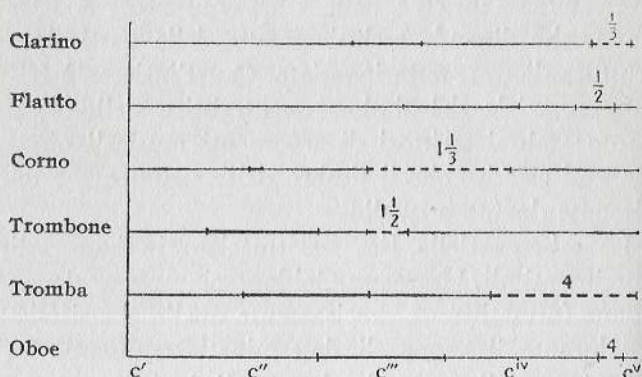



Fig. 52. - La zona formativa di alcuni strumenti orchestrali.

nando « mezzoforte » è un po' meno regolare e ci mostra la sovrapposizione delle armoniche alla nota fondamentale, allorchè lo strumento venga suonato con più forza. E, finalmente, la curva in basso ottenuta suonando « forte » contiene un numero ancor maggiore di armoniche: predominanti la seconda e la terza.

Sulla stessa tavola, la fig. 2 ci fa vedere la curva del suono di un DO (ott. centr.) suonata con un oboe. Passando alla tavola IX, la fig. 1 ci mostra la curva di un SOL♯ suonata con un sassofono. In entrambe le curve l'acutezza e la frequenza dei pic-

chi stanno a indicare il gran numero delle armoniche alte.

Su questa stessa tavola la curva superiore corrisponde a un DO (ott. centr.) di frequenza 257 emesso da un clarino suonato « mezzoforte ». Presenta meno asperità delle due precedenti (oboe e sassofono) e quindi ne deduciamo che le armoniche alte non sovrabbondano. Non sempre tuttavia al suono del clarino corrisponde una curva così regolare. In basso infatti (stessa fig.) scorgiamo la curva della stessa nota, emessa però da un diverso clarino. Vediamo, in essa, varie serie di asperità piuttosto marcate, ricorrenti a intervalli: una per ogni onda corrispondente alla nota fondamentale. Ciò rappresenta esattamente quel che, logicamente, ci dobbiamo aspettare dall'emissione di armoniche vicine o consecutive. Indagini metriche condotte con assoluta precisione han dimostrato che undici e mezzo di tali brevi depressioni occupano un tratto di curva (vale a dire hanno avuto una durata di tempo) uguale a quello di una singola onda della nota fondamentale, cosicchè potremmo essere indotti a identificare le armoniche emesse con la undecima e la dodicesima (con qualche approssimazione FA♯ 3ª ott. e SOL 3ª ott.). Il prof. Miller ha studiato le asperità della curva analizzandola nelle varie armoniche componenti. Egli ha verificato che le ampiezze rispettive delle diverse componenti sono le seguenti:

1ª armon.	DO	(ott. cent.)	= 29	2ª armon.	DO	(1ª ott.)	= 7
3ª »	SOL	(1ª ott.)	= 20	4ª »	DO	(2ª »)	= 1
5ª »	MI	(2ª »)	= 2	6ª »	SOL	(2ª »)	= 6
7ª »	SI♭	(2ª ott.)	= 6	8ª »	DO	(3ª »)	= 8
9ª »	RE	(4ª ott.)	= 16	10ª »	MI	(3ª »)	= 9
11ª »	FA♯	(3ª ott.)	= 30	12ª »	SOL	(3ª »)	= 35

È interessante notare che la undecima e dodicesima armonica, di frequenza rispettivamente 2827 e 3084, sono più intense della nota fondamentale di frequenza 257 e, dato che l'orecchio percepisce più facilmente le note che hanno frequenze alte anzichè basse, il suono che l'orecchio ode deve consistere sopratutto delle suddette armoniche. Dalla fig. 52 possiamo rilevare che queste note alte son vicine al campo della zona formativa.

CAPITOLO QUINTO

ARMONIA E DISACCORDO

Gli argomenti trattati in queste pagine sono desunti in parte da dottrine scientifiche e in parte lumeggiano elementi d'indole artistica. Occorre subito far presente che, tra i due campi, il confine non è chiaramente tracciato. La scienza non recherà ausilio di sorta a chi, per esempio, si curi di sapere se la musica di Giovanni Sebastiano Bach è più bella di quella del figlio suo, Filippo Emanuele. Si tratta di una questione che solo gli artisti sono in grado di discutere, e, d'altronde, è perfettamente ammissibile, per quanto poco probabile che, anche al riguardo, essi non si trovino d'accordo. Qualora, invece, ci domandiamo se la musica dei due Bach è più gradevole di un coro di gatti in amore sui tetti, la risposta sarà pronta e sicura. Gli artisti saranno tutti d'accordo al riguardo e la scienza, dal canto suo, sarà in grado di spiegare (almeno in larga parte) perchè così sia.

Possiamo dir la cosa anche in modo diverso. La musica ha per fine di disporre variamente i diversi suoni, di formarne cioè tante combinazioni e raggruppamenti in guisa tale da arrecare un certo diletto al cervello, per mezzo dell'udito. Fra due brani musicali entrambi ugualmente piacevoli, solo l'ar-

tista è all'altezza di decidere quale sia più gradevole; però lo scienziato ci potrà spiegare il motivo pel quale ve ne siano alcuni che non lo sono affatto. Egli non potrà spiegarsi perchè troviamo che la musica di Bach sia particolarmente gradevole, ma potrà bensì indicarci le ragioni per le quali un coro di gatti ci arreca tanta noia. Eccoci giunti all'oggetto del presente capitolo: come si spieghi cioè che alcuni raggruppamenti di suoni siano piacevoli all'orecchio mentre altri siano tanto sgradevoli.

I BATTIMENTI E LA DISSONANZA

A pag. 70 abbiamo immaginato che due diapason suonino simultaneamente. L'altezza di uno di essi vien mantenuta a 261 vibrazioni al secondo; l'altro invece inizia con una ampiezza di 262 periodi e questa vien poi gradualmente aumentata. Dapprima, crescendo l'altezza del suono, si avvertono dei battimenti che in seguito però non si distinguono più. Per quanto riguarda l'udito, in un primo tempo l'insieme dei due suoni si mantiene gradevole all'orecchio, poi, coll'aumentar dei battimenti al secondo, diviene spiacevole. Tale sensazione sgradita raggiunge il massimo allorchè i battimenti divengono 23 al secondo. In seguito anche la spiacevolezza diminuisce. Brues volle condurre l'esperimento sino alla scomparsa dei battimenti e constatò che la diminuzione dell'udir spiacevole è solo lieve. A parer suo anzi la molestia si mantiene pressochè costante sino a che si raggiunga l'ottava di frequenza 522, limite al quale scompare senz'altro.

Effettuando lo stesso esperimento mediante corde di violino si otterranno risultati ben diversi. La sensazione sgradita non si mantiene costante ma oscil-

la irregolarmente. È debolissima all'intervallo di terza maggiore e di quarta, e scompare poi completamente agli intervalli di quinta e di ottava. Quando si pervenga precisamente a quei punti nei quali la sensazione spiacevole è minima, i rapporti fra la frequenza della nota che varia e quella della nota costante hanno i seguenti valori: 5/4, 4/3, 3/2, 2/1.

L' ACCORDO E I NUMERI PICCOLI

Gli studiosi, sin dai tempi più antichi, hanno rilevato la seguente legge generale: due note suonano bene assieme allorchè il rapporto fra le loro frequenze viene espresso mediante numeri piccoli; che anzi, più piccoli essi sono, migliore è l'accordo. La tabella che segue illustra la legge or ora espressa; in essa abbiamo disposto gli intervalli corrispondentemente all'incremento di dissonanza:

Intervallo	Rapporto delle frequenze	Numero massimo che figura nel rapporto
Unissono	1 : 1	1
Ottava	2 : 1	2
Quinta	3 : 2	3
Quarta	4 : 3	4
Terza maggiore	5 : 4	5
Sesta minore	5 : 3	5
Terza minore	6 : 5	6
Sesta maggiore	8 : 5	8
Seconda	9 : 8	9

E così via.

Per dirla alla buona: più ci si allontana dai numeri piccoli, più marcata sarà la dissonanza. Cose d'altronde, note a Pitagora, 2500 anni or sono.

Da quanto ci risulta, egli fu il primo a formulare la seguente domanda: « Come si spiega che la consonanza sia sempre associata al rapporto di due numeri piccoli? ».

Numerosi sono stati, sin da quell'epoca, i tentativi fatti per rispondere a questa domanda, pure, una risposta precisa ed esauriente si può dire non esista ancora.

L'ipotesi fondamentale della dottrina di Pitagora dice: « Tutta quanta l'armonia della natura è basata sui numeri ». Evidentemente questa asserzione forniva la risposta più immediata alla domanda di cui sopra, ma, così facendo, si può dire costruisse su basi metafisiche tutt'altro che dimostrate. Al tempo di Confucio, i filosofi cinesi dettero una risposta al quesito, ma anche questa su basi malsicure. Essi infatti reputavano che i numeri 1, 2, 3 e 4 sono la fonte di ogni perfezione.

LEONARDO EULER E LA TEORIA DELL' ARMONIA

Nel 1738 Leonardo Euler, matematico insigne, cercò di dare una spiegazione al discusso problema, basandosi su dati psicologici ed asserendo che la mente umana trae gioia dall'ordine e dalle leggi e che perciò tali elementi va cercando nelle cose naturali, in quanto da tale ricerca ne viene ad essa un diletto. Ora, più piccoli sono i numeri occorrenti ad esprimere il rapporto di due frequenze, più facile è, indubbiamente, la scoperta di quella legge e di quell'ordine del quale parlavamo. Quindi: le note relative saranno maggiormente gradevoli ad udire. Questo, almeno, era il punto di vista di Leonardo Euler, il quale era talmente sicuro della propria as-

serzione da proporre l'adozione di un metro ben definito col quale commisurare la dissonanza di un dato accordo. Consisteva la sua proposta nell'esprimere il rapporto di frequenza dell'accordo di cui si trattava, per mezzo dei più piccoli numeri applicabili e poi di trovare il loro minimo comune multiplo. Quest'ultimo, secondo Euler, rappresentava la misura della dissonanza dell'accordo. Per esempio: il rapporto delle frequenze delle note dell'accordo: DO (picc. ott.) MI (picc. ott.) SOL (picc. ott.) DO (ott. centr.) è 4/5; 5/6; 6/8. Orbene, la misura della dissonanza sarà data da 120 giacchè questo è il minimo comune multiplo dei fattori 4, 5, 6, 8.

È facile criticare tale proposta, sotto ogni punto di vista. Anzitutto non spiega certi fatti, giacchè attribuisce la stessa misura di dissonanza, vale a dire 120, all'accordo di settima DO (ott. picc.) MI (idem) SOL (idem) SI (idem), (i cui rapporti di frequenza sono 8, 10, 12, 15) e all'altro, or ora visto, che è *molto meno* dissonante. Oltre a ciò: qualora noi alteriamo la frequenza di una nota, poniamo del MI (ott. picc.) dell'uno per cento (circa 1/6 di semitono) centuplicheremo la misura di dissonanza posta da Euler; se poi riduciamo la variazione di frequenza a un decimo del precedente valore, otterremo lo strano risultato di aumentare dieci volte la predetta misura di dissonanza. Vale a dire che, seguendo il sistema proposto da Euler, se noi alteriamo di una quantità infinitamente piccola quella che è la frequenza normale di una nota, la dissonanza tende subito all'infinito; una vera e propria « reductio ad absurdum ». E, per finire, la teoria di Euler non ci spiega davvero perchè ci sia gradito l'accordo di cui sopra, con le sue 120 unità di disturbo

auditivo quando potremmo ridurre le suddette unità a 24 escludendo da esso il MI. D'altronde, sempre secondo Euler, il disturbo auditivo potrebbe esser ridotto al minimo... col non suonare affatto l'accordo stesso! Occorre tuttavia porre in chiaro che quasi tutte le teorie sulle dissonanze hanno, quale più quale meno, il difetto al quale abbiamo alluso. Numerosissime sono le teorie capaci di indicarci l'origine del disturbo auditivo che l'orecchio percepisce udendo una dissonanza, ma non ve n'è alcuna che nemmeno tenti di spiegare quale sia l'origine del diletto che proviamo udendo concenti armoniosi; che anzi, per quanto ciò possa apparirci strano e fors'anche ridicolo, quest'ultimo quesito forma tuttora uno dei lati più oscuri della musica.

Volendo trovar comunque una soluzione del problema pensiamo che questa dovrebbe essere, a un dipresso, la seguente: un essere costituzionalmente sano trae diletto dall'esercizio di una qualunque delle facoltà, fisiche e morali, di cui è dotato da natura. Che anzi — entro certi limiti — maggiore sarà l'esercizio della facoltà suddetta e maggiore sarà il diletto che quella persona ne trarrà. Ci fa piacere udire l'accordo DO-SOL, anzichè il suono del solo DO, perchè la leggerissima dissonanza delle note è molto minore del piacere che all'udito arreca l'aggiunta del SOL. D'altronde non ci procura alcun piacere il suono simultaneo delle due note DO, DO♯ (picc. ott.) giacchè il disturbo auditivo è talmente spiccato che l'aggiunta della nota tenderebbe piuttosto a farci pensare che sia vero il contrario di quanto abbiamo poc'anzi asserito...

LA TEORIA DELL' ARMONIA SECONDO D' ALEMBERT

Sino all'epoca di cui ci accingiamo a parlare, tutte le teorie relative all'armonia avevan posto la loro base su dati aritmetici o metafisici. Fu un altro matematico e precisamente il D'Alembert (1762) a tentare una teoria che si ispirasse alla fisica, pur ammettendo egli di aver preso le mosse da certe speculazioni di un suo predecessore, il Rameau (1721). Le teorie di questi due scienziati son basate sul fatto che ogni nota fondamentale, che si può udire in natura, vien sempre accompagnata dalla sua seconda armonica (l'ott.), dalla sua terza armonica (la dodicesima) e così via. Dato poi che l'intervallo compreso fra l'ottava e la dodicesima è una quinta, essi ne dedussero: « esser quanto mai rispondente agli schemi di natura » che due note, divise da un intervallo di quinta suonassero bene assieme, e così via.

LA TEORIA DELL' ARMONIA SECONDO HELMOLTZ

Dopo questi, Ermanno von Helmoltz, nel 1862 dette sviluppo a una sua teoria sulla consonanza e la dissonanza, basata sui battimenti; teoria alla quale non son mancate discussioni e critiche e che pure, sino ad oggi, è la più accreditata. Abbiamo già visto che le note DO e DO♯ suonano male assieme per il fatto che dànno luogo a sgradevoli battimenti. Nel caso invece di più ampi intervalli, quali ad esempio quello esistente fra le note DO e FA♯, non si può parlare di battimenti, perchè non ve ne sono di udibili; tuttavia Helmoltz asserì che un DO (ott.

picc.) e un FA♯ (ott. picc.) suonano male assieme perchè talune, tra le loro armoniche, (per esempio il SOL (ott. centr.) e il FA♯ (ott. centr.) dànno origine a sgradevoli battimenti. D'altronde il DO (ott. picc.) e il SOL (ott. picc.) suonano bene assieme perchè poche delle loro armoniche dànno luogo a spiacevoli battimenti. Trascriviamo le due note suddette e, accanto, le relative armoniche:

DO	(ott. picc.)	do	(ott. centr.)	sol	(ott. centr.)
do	(1ª ottava)	mi	(1ª ottava)	sol	(1ª ottava) etc.

SOL	(ott. picc.)	sol	(ott. centr.)	re	(1ª ottava)
sol	(1ª ottava)	si	(1ª ottava)	re	(2ª ottava) etc.

È un fatto che molte armoniche son comuni ad ambo le note. In base a questa teoria, l'ottava diventa il più perfetto di tutti gli accordi, dato che nessuna delle armoniche può dar luogo a battimenti più sgradevoli di quando una nota vien suonata da sola. La teoria suddetta a volte vien posta sotto una forma un po' diversa e cioè: « due note suonano bene assieme quando (e perchè) hanno certe armoniche in comune ». Tale enunciato, tuttavia, non prende nella dovuta considerazione il disturbo auditivo che può venire arrecato da quelle armoniche che non sono in comune.

La teoria spiega altresì perchè le dissonanze originate da due diapason (pag. 188) abbiano un timbro talmente diverso da quello degli strumenti musicali in genere: i diapason non possedendo armoniche alte non sorgon quindi i battimenti che queste ultime fanno fra loro.

D'altronde son sufficienti pochi esperimenti eseguiti con strumenti orchestrali oppure alla tastiera di un organo per assicurarsi che la teoria di Hel-

moltz è essenzialmente vera. Se all'organo, dando fiato al registro del flauto, suoniamo l'accordo DO (picc. ott.) MI (picc. ott.) SOL (picc. ott.) DO (ott. centr.) non udremo alcuna dissonanza. Se invece suoniamo lo stesso accordo in un registro nel quale le armoniche sian più pronunciate che non in quello del flauto, la dissonanza sarà più marcata. Dobbiamo quindi attribuire logicamente questo fatto alle armoniche, giacchè, così facendo non abbiamo provocato fattore alcuno che tale dissonanza abbia potuto originare. Essa è già percettibile nel registro del diapason e comincia ad arrecare effettivo disturbo in quello di tromba o clarino. Diventa poi insopportabile nel registro « combinazioni », un registro formato da sole armoniche; udremo ad esempio il DO (1ª ott.), (2ª armonica del DO ott. centr.) dar luogo a un battimento col SI (ott. centr.), (3ª armonica del MI picc. ott.); il SOL (1ª ott.), (terza armonica del DO ott. centr.) col SOL♯ (1ª ott.), (5ª armonica del MI picc. ott.). Mantenendo l'accordo suddetto, e aggiungendo successivamente registri all'uopo scelti, udremo di pari passo aumentar la dissonanza man mano che le varie armoniche si fanno sentire.

In orchestra avviene un fatto analogo; certi accordi, gradevoli quando siano i flauti o le corde a emetterli, divengono intollerabili suonati dall'oboe o dal clarino. Rilevando come sian ben pronunciate le armoniche tracciate nelle tavole VIII e IX, comprenderemo facilmente la ragione del fenomeno.

Helmoltz si provò a saggiare la teoria che egli aveva formulata, calcolando quanta dissonanza essa implicava per differenti intervalli.

Cominciò coll'ammettere (sia pure un po' arbitrariamente) una legge relativa alla misura della dis-

sonanza prodotta dal suono di due note pure, separate da un determinato intervallo; calcolò quindi (e gli bastò sommare) la dissonanza totale prodotta dal suono contemporaneo di tutte le armoniche di un paio di note. Ciò, beninteso, dipendeva dalla misura con la quale le diverse armoniche si fanno sentire per ciascuna nota e Helmoltz, per ciò, si basò sulla proporzione in cui le armoniche entrano a far parte di una nota emessa da un violino.

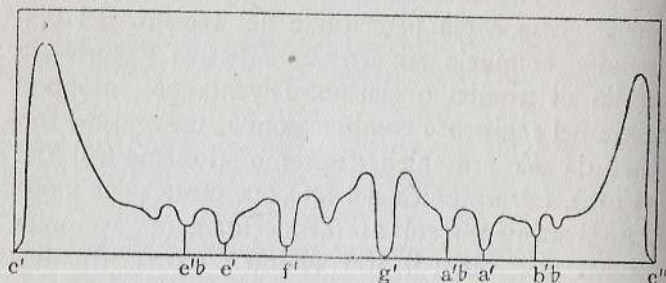



Fig. 53. - Grafico della dissonanza che si manifesta, allorchè due violini suonano contemporaneamente e uno di essi emette solo il Do della ottava centrale; l'altro invece suona, a partire dal Do dell'ottava centrale, le varie note sino al Do della 1ª ottava. I valori corrispondenti ai vari gradi di dissonanza, son riportati sull'asse delle y (verticalmente). (Helmoltz).

La fig. 53 ci mostra, schematicamente, i risultati dei suoi calcoli. Si suppone che la corda di uno dei due violini suoni il DO (ott. centr.) costantemente, mentre quella del secondo strumento passa gradualmente dal DO (ott. centr.) al DO (1ª ott.). I massimi della curva, dànno la misura della dissonanza e, come vedesi, i principali accordi e, reciprocamente, le principali dissonanze, entro i limiti della ottava, son riprodotti con fedele corrispondenza.

Un saggio anche migliore avremmo valendoci dei

dati sperimentali esatti ottenuti da Brues nella ricerca della dissonanza fra note pure, ma i risultati concordan poi con quelli or ora indicati.

COME È SORTA LA SCALA MUSICALE

Voglia adesso il nostro cortese lettore tener presente quanto gli siamo andati esponendo: ciò potrà giovargli nel cammino che ancora ci resta da percorrere. Cerchiamo dunque di immaginare quale possa essere stata, nel remoto passato, l'origine delle diverse scale musicali. Non ci resta purtroppo dato storico certo, di veruna sorta, che ci riveli in modo preciso come la musica stessa entrò a far parte delle varie attività umane; sappiamo solo che, probabilmente, i primi suoni musicali furono emessi da strumenti a corda o a fiato. Può darsi che l'uomo preistorico si sia accorto di trarre un certo diletto dal ritmo caratteristico di due legni percossi o anche dal rullo di una forma molto primitiva di tamburo. Questi potrebbe avergli servito per segnare il tempo durante le danze o le marce, ma sembra comunque probabile che (come abbiam già detto) l'uomo primitivo scoprisse il diletto musicale dei suoni udendo la vibrazione emessa da certe corde. Per esempio, il ronzare del suo arco da caccia. O anche il suono di corpi cavi tubolari: lo zufolar del vento sul bordo di una canna mozzata. Si conservano nei musei antiche immagini e rilievi che ritraggono l'uomo tuttora nella prima infanzia della civiltà suonar la lira e la zampogna. A Ur, in Caldea, Ser Leonard Wooley scoprì, dalle viscere della terra, i resti di una lira a undici corde e ciò dimostra che 5000 anni or sono (e fors'anche più) l'uomo non si contentava più del piacere prodotto in lui da

un suono isolato ed era riuscito ad averne uno più complesso: quello derivantegli da un susseguirsi di suoni. La fotografia che vedesi nel frontespizio di questo libro riproduce due bande composte di musicisti Sumeri; le immagini appaiono su tavolette di terra cotta di circa 4600 anni or sono. Tali immagini non han bisogno di alcun commento. Esiste altresì un dipinto egiziano di circa 2750 anni avanti Cristo, raffigurante un'intiera orchestra composta di sette suonatori. Due di essi suonano strumenti a corda e tre strumenti a fiato; altri due, in mezzo alla scena, batton le mani, quasi a marcare il tempo e ciò dimostra che la scoperta dell'unità del direttore d'orchestra era ancor di là da venire ma che l'umanità di 5000 anni or sono aveva già una idea di cosa fosse la melodia. Può anche darsi che l'uomo di quei tempi remoti conoscesse anche l'armonia ma la cosa è tutt'altro che sicura. Infatti nelle forme assolutamente primordiali di civiltà sembra che la musica sia stata omofonica, come d'altronde lo è tuttora (almeno in gran parte) presso i Cinesi, gli Indiani, i Turchi, gli Arabi e persino i Greci moderni.

In un secondo tempo si deve esser pensato di suonare due o più note contemporaneamente e ciò magari perchè risultava impossibile di far cantare uomini e fanciulli allo stesso diapason o anche perchè la musica omofonica cessò di piacere. Sino al momento di cui parliamo l'esatto diapason delle note prescelte per comporre la scala aveva avuto ben poca o nulla importanza; d'ora in poi, invece, diventava elemento di primaria importanza che si potessero suonare due o più note contemporaneamente senza che ne risultasse, acusticamente, alcuna dissonanza. Anche ai giorni nostri, molte razze che

non hanno ancor sorpassato lo stadio omofonico della musica (Arabi, Persiani e Giavanesi) usano scale le cui note non sono fra loro consonanti; vero si è che di tale inconveniente l'ascoltatore non si accorge affatto perchè non si odono mai due note suonate contemporaneamente. D'altra parte vi sono razze ancor primitive, la cui musica è già polifonica e che usano scale nelle quali la maggior parte degli intervalli costituisce un accordo.

L'accordo più semplice e il più perfetto, l'ottava, deve essere stato scoperto da gran tempo. È infatti l'accordo fondamentale nella musica di tutti i popoli, anche di quelli tuttora allo stato semi-selvaggio. A quanto ci risulta, gli antichi greci non usavano altro accordo nella loro musica, per quanto è quasi certo che ne conoscessero altri. Aristotile ci dice che le voci degli uomini e dei ragazzi, cantando, formano un'ottava e si domanda: « Perchè cantiamo soltanto l'accordo di ottava? E perchè sulla lira non si ode che quello? ». Il filosofo, d'altronde, risponde anche alla domanda postasi e spiega che gli altri accordi non erano in favore perchè: « le due note si nascondono l'una dietro all'altra » e paragona la musica a più voci a varie persone « che dicono la stessa cosa tutte assieme, allorchè ci sarebbe tanto più agevole comprenderne una sola, allorchè parla ». Il che ci fa logicamente supporre che Aristotile non possedesse un orecchio eccessivamente polifonico...

Ciò nonostante era prossimo un tempo nel quale quel costante ripetersi di ottave doveva apparire sterile e privo d'interesse; prova ne sia la proibizione scolastica delle ottave consecutive, restrizione questa che si estese poi anche alle quinte, suonate consecutivamente. È facile immaginare co-

me avvenisse la scoperta dell'accordo di quinta: DO-SOL, probabilmente introdotto, in un primo tempo, sotto forma di un accordo di quarta, scemando di altezza le note: DO (ott. centr.) SOL (idem) oppure FA-DO. Aggiungendovi l'ottava, il nostro musicista potrà così disporre di una serie di quattro corde, DO, FA, SOL, DO (ott. centr.), delle quali ogni coppia (eccetto FA-SOL) può venir sollecitata contemporaneamente, senza tema di crear disturbo auditivo. Nicomeo scrive che, sin dai tempi leggendari di Orfeo, le corde della lira venivano accordate in modo da suonar appunto le note suddette.

Tuttavia, il possessore di una lira del genere non disponeva davvero di un ricco assortimento di note, per la sua musica. Si comprende facilmente come egli cercasse di aumentare il numero delle corde, avendo cura però che ogni nuova corda aggiunta non dovesse poi dar origine a suoni sgradevoli, qualora sollecitata contemporaneamente alle corde che già si trovavano sul suo strumento. Su una lira le cui corde dessero le note DO-FA-SOL DO (ott. centr.) i due DO posson suonare simultaneamente con ciascuna delle nuove note aggiunte: FA e SOL senza dar luogo a dissonanza; il FA e il SOL posson suonare solo con l'uno o l'altro dei DO dato che i due assieme darebbero luogo allo stesso nuovo accordo di prima. Potrebbe, il nostro preistorico musicista, provarsi a dare al SOL una nuova possibilità di accordo, aggiungendo una quinta corda; il RE. Ancora un passo avanti e vedremo comparire il LA, sonoro compagno del RE. Il più è ormai fatto e il nostro emulo di Orfeo disporrà così di una schiera di note: FA-DO-SOL-RE-LA-MI-SI ognuna delle quali si accompagna gradevolmente e dà un

bel suono sia con la nota che la precede che con quella che la segue nella serie. C'è però un inconveniente: la prima e l'ultima nota hanno soltanto una sorella con la quale van d'accordo. Per ovviare a ciò il neo-musicista raddoppierà i suoi sforzi, col risultato che, a un certo punto, scoprirà che nella sua serie cominciano a ripetersi i termini. Ecco perchè la serie delle sue note non si può disporre su una linea retta (il che farebbe supporre termini sempre nuovi e diversi) ma bensì gli risulterà disposta su un cerchio, a somiglianza delle ore sul quadrante di un orologio (ved. fig. 54). Disposta così la serie, circolarmente, ogni termine (ogni corda) ha due note con le quali dà un bel suono: una di fronte e una di dietro.

Riteniamo superfluo aggiungere che la forma di racconto che abbiam dato alle cose esposte è parto di fantasia e ciò, non foss'altro, per la buona ragione che quel neo-musicista dell'età primordiale non è mai esistito, o almeno allo stato di singolo individuo. Sono indubbiamente esistite, invece, numerose tribù e popoli di varie regioni, in seno alle quali la musica è sorta e si è sviluppata indipendentemente ed in circostanze quanto mai dissimili. Certo si è, d'altronde, che tutte queste famiglie umane hanno concorso, inconsapevolmente, ad uno stesso scopo. Anche il criterio che le guidava dev'esser stato, precisamente, quello che la nostra fantasia ha attribuito al musicista immaginario di poc'anzi: fare cioè una scelta di rumori gradevoli all'orecchio, e scartare, invece, quelli che, per loro natura, fossero spiacevoli o irritanti; individuare delle consonanze e lasciar da parte le dissonanze. In conclusione, tutte queste tribù, finirono per ottenere lo stesso risultato e, ripensandoci, non può non destar meravi-

glia il preciso parallelismo delle vie seguite e la perfetta concordanza dei movimenti che le animavano. Si pensi, a tal uopo, che tutti questi popoli parlavan lingue totalmente dissimili, chè profondamente diverse erano le loro costumanze, le loro fogge di vestire, i riti loro, le abitudini e via dicendo. Pure, tutti quelli che hanno sorpassato lo stadio omofonico della musica possiedono oggi scale musicali che, se pur non identiche fra loro, son tutte basate sullo stesso principio.

Le differenze più sensibili si rilevano quando si

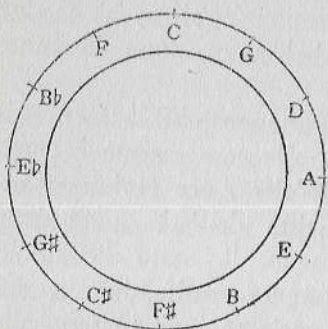



Fig. 54. - Il « quadrante delle note », con i dodici semitoni dell'ottava disposti a cerchio. Ciascuna nota, suonata assieme a quella che, sul « quadrante » la segue o la precede, genera un accordo di quinta.

prenda in considerazione il numero delle note che costituiscono una data scala. A seconda dell'estremo dell'intervallo che si considera nella serie di note FA-DO-SOL-RE-LA... si otterranno le varie scale che compaiono nelle musiche di quasi tutte le razze che hanno ormai sorpassato la musica monostrumentale dell'uomo preistorico.

Le prime tre note della serie DO, FA e SOL formavano le note principali della scala degli antichi Greci. Se invece andiamo oltre e vi comprendiamo anche altre note, DO, RE, FA, SOL e LA avremo la scala a cinque note (pentafonica) e che è a base

di numerosi brani musicali della Scozia, della Cina, dell'Asia Meridionale, dell'Africa Orientale ed altre regioni; trasportandola di un semitono più alto avremo la scala formata dai tasti neri del piano. Ecco perchè tanti canti scozzesi, fra i quali l'Auld Lang Syne, sono particolarmente adatti per esser strimpellati al piano dai più piccini, in quanto non occorre toccare i tasti bianchi. Che anzi, qualunque strimpellata sui tasti neri arieggia una composizione scozzese. La scala diatonica ordinaria, formata dalle sette note, introdotta probabilmente in Grecia verso la metà del VI secolo a. C. fu adottata a modello da Pitagora ed è rimasta la scala di norma per la musica occidentale, da allora in poi. Quando, con precisione, abbia avuto inizio non è dato sapere. Garstang rinvenne due flauti Egiziani, certamente non posteriori all'anno 2000 a. C., dai quali si può tuttora trarre la scala a sette note DO, RE, MI, FA♯, SOL, LA, SI: scala quindi che si identifica con la Sintolidia dei greci antichi.

E, per finire, diremo che le dodici note, poste circolarmente, come nel quadrante di un orologio, costituiscono la scala cromatica completa della musica moderna.

IL PROBLEMA DEL TEMPERAMENTO

Giunti così a quest'ultima scala, ci troviamo di fronte a una difficoltà. Le note che, dopo l'ottava, dànno l'accordo migliore, acusticamente, hanno le frequenze che stanno fra di loro come 3 e 2 (3/2 uguale 1,5). Ciò è ovvio d'altronde quando si consideri che esse costituiscono la seconda e terza armonica della stessa nota fondamentale. Quindi, perchè l'accordo risulti perfetto, ogni percorso corri-

spondente all'intervallo spaziale di un'ora, sul nostro quadrante delle note, fa sì che la frequenza venga moltiplicata per 1,5. Dodici di tali passi l'aumenteranno, evidentemente, di: 12 × 1,5 ossia 129,75. Abbiamo già detto però che queste dodici mosse, o spostamenti, ci riconducono al DO che è sette ottave sopra al DO dal quale siamo partiti. Ci accorgiamo, tuttavia, che in tal modo, non siamo tornati allo stesso punto: infatti la frequenza di quest'ul-

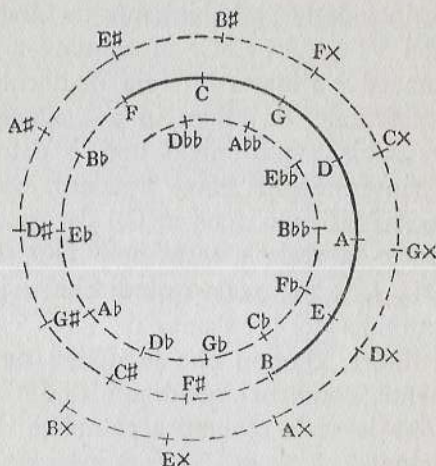



Fig. 55. - Ecco la forma assunta dal « quadrante » quando gli intervalli di quinta siano esatti. Si ottiene una serie di note tendente all'infinito, dato che alcune, come il Si, il Do e il Re, sono ora di diverso diapason.

timo DO è solo 128 volte quella della nota di partenza. Evidentemente abbiamo oltrepassato il segno e siamo pervenuti ad una nota la cui frequenza è maggiore di quella di un DO di un fattore equivalente al numero: 1,0136 ed è un po' meno di un quarto di semitono. Questa differenza o intervallo è noto sotto il nome di: « Comma di Pitagora ».

Vediamo adesso lo stesso fenomeno sotto un altro punto di vista. Abbiamo detto che l'intervallo di una quinta corrisponde al rapporto di frequenza: 1,5. La nostra tavola a pag. 45 portava invece un valore lievemente diverso: 1,4983. Si tratta quindi di una differenza minima: parti 1,13 su mille. Però va considerato che, percorrendo tutte e dodici le divisioni del nostro quadrante, questa differenza si moltiplica anche essa per dodici e diviene così una differenza di 13,6 parti su mille equivalente a quasi un quarto di semitono.

Così facendo quel quadrante che avevamo tracciato si deforma e lo vediamo nuovamente in fig. 55. I suoi due estremi tendono adesso all'infinito, internamente ed esternamente; non è più quel circolo di prima, semplice ed elementare.

LA SCALA DI PITAGORA

Vari mezzi sono stati proposti per evitare questa complicazione. Pitagora volle esprimere coi numeri la scala musicale, non la comprese però tutta e ciò perchè non pensò di porre la serie delle sue note in forma di cerchio. Al DO egli fece corrispondere esattamente una volta e mezzo la frequenza del FA; al suo SOL una volta e mezzo la frequenza del DO e così via. Ottenne una scala i cui rapporti, fra le frequenze delle rispettive note, diamo nella seguente tabella.

Considerazioni di semplice aritmetica ci portano a concludere, dando uno sguardo a questa scala, che gli intervalli esistenti fra il DO e il RE, il RE e il MI, il FA e il SOL, il SOL e il LA, il LA e il SI, devono essere tutti eguali, e le frequenze star fra di

loro come 9 a 8. Pitagora dette il nome di « tono » a ciascuno di questi intervalli ma tralasciò i due più piccoli: il MI-FA e il SI-DO, in ciascuno dei quali, le note stanno fra loro in un rapporto un po' meno semplice: 256 a 243 equivalente a 1,0535. Pita-

Rapporto fra le frequenze secondo Pitagora	Intervallo secondo Pitagora	Rapporto fra le frequenze (ugual temperamento)
DO = 1,000		1,000
	Tono	
RE = $\frac{9}{8}$ = 1,1250		1,1225
	Tono	
MI = $\frac{81}{64}$ = 1,2656		1,2599
	Emitono	
FA = $\frac{4}{3}$ = 1,3333		1,3348
	Tono	
SOL = $\frac{3}{2}$ = 1,5000		1,4983
	Tono	
LA = $\frac{27}{16}$ = 1,6875		1,6818
	Tono	
SI = $\frac{243}{128}$ = 1,8984		1,8877
	Emitono	
DO = 2,0000		2,0000

gora denominò « emitoni » questi due ultimi. Un « emitono » di Pitagora è meno della metà di un suo « tono » e meno del moderno semitono. Infatti ecco i rapporti fra le rispettive frequenze:

Emitono di Pitagora . . . . = 1,0535
1/2 tono di Pitagora . . . . = 1,0606
Semitono di egual temperamento . . = 1,0595

Perciò l'ottava di Pitagora era formata mediante cinque toni eguali e due « emitoni » pure eguali; questi, come abbiamo già detto, eran minori dei semitoni.

La scala era perfetta e completa, beninteso sin dove giungeva. Otre alle ottave conteneva ben 4 accordi di quarta e quattro di quinta, vale a dire molti più di quanto non sia possibile ottenere da qualsivoglia altra scala comprendente otto note. Tale scala poteva venir estesa indefinitamente in un senso e nell'altro, portandosi nelle ottave di fianco. D'altronde va considerato che, avendo i Greci gusti semplici e piuttosto severi, le loro melodie non oltrepassavano quasi mai l'intervallo dell'ottava, anzi spesso si limitavano alla quarta.

Così facendo ottenevano di potersi valere esclusivamente dei migliori e più gradevoli toni della voce umana e per ciò, quando si spingevano nell'ambito di un'ottava superiore, provvedevano ad accorciare di altrettanto quella inferiore.

La lira normale, a otto corde, può aver inizio a qualsivoglia nota della scala, ma dovrà necessariamente terminare con la stessa nota dell'ottava superiore. La nota più bassa poteva esser scelta fra le sette note fondamentali (DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI) e ciò poteva farsi in sette modi diversi. Le varie disposizioni ebbero appunto il nome di « modi ». Li riportiamo nella seguente tabella.

La musica medioevale, e sopratutto quella Chiesastica, seguì i modi Greci. Inizialmente solo quattro vennero riconosciuti autentici, e cioè: RE - RE (ott. centr.), FA - FA (ott. centr.), MI - MI (ott. centr.), SOL - SOL (ott. centr.) dato che erano stati approvati da Ambrogio, Vescovo di Milano, nel 1300. Altri quattro modi furono poi aggiunti da

Papa Gregorio, e vennero chiamati: « Plagali ». Finalmente, nel 1500 il Glareàno (Enrico Loriti), nel suo Dodecachordon (Basilea 1547) elencò dodici modi e dette loro nomi Greci. Occorre dire, tuttavia, che la corrispondenza fra i suoi modi e quelli dei Greci, almeno in molti casi, è tutt'altro che esatta.

Intervallo	Denominazione (Antica Grecia)	Scala (a cominciar dal Do)	Nome ecclesiastico secondo il Glareàno
DO-DO (ott. centr.)	Lidio	DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI, DO (ott. centr.)	Ionico
SOL-SOL (ott. centr.)	Jonico	DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI♭, DO (ott. centr.)	Misolidio
RE-RE (ott. centr.)	Frigio	DO, RE, MI♭, FA, SOL, LA, SI♭, DO (ott. centr.)	Dorico
LA-LA (ott. centr.)	Eolio	DO, RE, MI♭, FA, SOL, LA♭, SI♭, DO (ott. c.)	Eolio
MI-MI (ott. centr.)	Dorico	DO, RE♭, MI♭, FA, SOL, LA♭, SI♭, DO (ott. c.)	Frigio
SI-SI (ott. centr.)	Misolidio	DO, RE♭, MI♭, FA, SOL♭, LA♭, SI♭, DO (ott. c.)	Locrese
FA-FA (ott. centr.)	Sintolidio	DO, RE, MI, FA♯, SOL, LA, SI, DO (ott. centr.)	Lidio

Dei dodici modi del Glareàno molti, sin dal loro apparire, furon giudicati poco buoni e non son mai stati usati; altri, col passar del tempo, son caduti in disuso.

Nel 1600 poi i musicisti ritennero che solo due modi fossero veramente buoni e son quelli chiamati: DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI-DO (magg.) e LA-SI-DO-RE-MI-FA-SOL-LA (minore).

Una serie di note, suonate in successione, non costituisce davvero una melodia nè è tale da destare in noi alcun diletto musicale. Perchè in noi moderni il senso musicale sia appagato occorre un altro elemento e cioè: la tonalità. Il senso musicale non ama sorvolare indifferentemente lungo tutta la scala, preferisce sostare, in ciascun caso, su una determinata nota, quella che dà il tono al brano musicale, la nota in chiave. Su di essa ci soffermiamo perchè ci sembra che costituisca un punto fisso, diremmo quasi, il centro di quella data musica.

Chi viaggia identifica ogni tappa del suo viaggio riferendosi alla distanza che intercede fra quel punto del percorso e casa sua. In fatto di musica, noi moderni facciamo un po' lo stesso: misuriamo ogni nota di un determinato brano, col metro dell'intervallo che lo separa dalla nota in chiave. Perciò il compositore accorto cerca, sin dalle prime battute, di richiamare la nostra attenzione sulla nota in chiave e poi, durante tutta l'esecuzione del brano, ce ne farà seguire la posizione, sempre relativamente alla nota che abbiamo chiamata « centrale ». Tanto è vero che, di solito, ci sembra che la musica, o almeno l'accompagnamento, debba logicamente terminare con la nota in chiave, così come il viaggiatore pensa che, alla fine del viaggio, tornerà a casa sua. Nessun altro punto della nostra peregrinazione (terrestre o musicale) potrebbe apparirci conclusivo.

Anche la musica dei Greci aveva una « nota in chiave »; era la nota di mezzo della lira. Aristotile ci dice infatti a tale riguardo: « Un buon brano musicale ricorre spesso alla nota della corda mediana della lira ed i buoni compositori, che lo sanno, se ne valgono di frequente. Se a volte se ne sco-

stano, finiscono poi per tornarvi sopra e questo è un fatto che non avviene per alcun altra nota ».

Dato il discreto numero dei modi che esistevano, il compositore era in grado di conferire notevole varietà alla sua musica, ricorrendo ora all'uno ora all'altro; poi, siccome decrebbe il numero dei modi, l'artista dovette valersi di altri sistemi per variare gradevolmente la propria musica. Nelle composizioni moderne vediamo che l'artista non si limita a variare le note in chiave per ciascuno dei brani che compone, ma, allo scopo di tener desta l'attenzione emotiva dell'ascoltatore, è indotto a passare, anche nella stessa composizione, da una nota in chiave all'altra.

Supponiamo che egli cominci dal DO, come nota in chiave, e si valga, come scala, della serie di note: « DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI-DO ». Di lì a poco, egli potrà passare al SOL come nota in chiave e valersi della scala: « DO-RE-MI-FA♯-SOL-LA-SI-DO ».

Ci appare, sin da ora, quale fosse il grande inconveniente della scala musicale di Pitagora, da un punto di vista moderno, beninteso. Con essa non si poteva passare da un tono all'altro (modulare) e ciò perchè la scala non contiene il FA♯ nè altri semitoni. Crearli non si poteva, dividendo a metà gli intervalli di un tono intero, giacchè due semitoni (emitoni) di Pitagora — l'abbiamo già visto — non formavano un tono.

Vediamo adesso un'altra lacuna, anch'essa, certamente, di non minore entità. Gli unici numeri che compaiono nei rapporti di frequenza della scala di Pitagora sono il 2, il 3 e le loro potenze: $2^2=4$, $2^3=8$, $3^2=9$, ecc.; non vi figurano affatto i numeri 5, 7 e 11. Invece i rapporti di frequenza di una no-

ta e delle sue varie armoniche sono rappresentati dalla serie completa dei numeri 2, 3, 4, 5, 6, 7, ecc., cosicchè la maggior parte di tali armoniche non trova, nella scala di Pitagora, le note corrispondenti. Ora la teoria di Helmoltz pone bene in chiaro che non sono le note della scala di Pitagora, bensì le loro armoniche, a dar luogo a quelle consonanze che sono bene accette all'orecchio.

Per addurre un esempio semplicissimo: la quinta armonica del DO (picc. ott.) ha una frequenza quintupla della nota fondamentale. La nota che più le si avvicina, nella scala di Pitagora, il MI (1ª ott.) ha la frequenza espressa dal rapporto 81/16 ossia, in valore decimale, 5,06 volte quella della nota fondamentale DO (picc. ott.) e perciò è in disaccordo di circa 1/5 di semitono con la 5ª armonica del DO (picc. ott.). Suonando appunto il DO (picc. ott.) sarà proprio la 5ª armonica che si farà sentire giacchè abbiamo notato (pag. 108 e 109) che soltanto le armoniche naturali son quelle provocate dal fenomeno di risonanza; questa armonica, naturalmente, sarà in pieno disaccordo con il MI (1ª ott.) di Pitagora. Perciò la nota che il nostro orecchio vuole sentir risuonare con il DO (ott. picc.) non è il MI di Pitagora, bensì il MI, nota armonica di quello.

Da quanto siam venuti esponendo, risulta chiaramente che tali complicazioni sono insite nella natura dei fenomeni studiati; sorgono da leggi aritmetiche e il musicista è impotente a modificarle. Quand'anche ci portassimo su un altro pianeta vi troveremmo le stesse leggi che vigono sulla nostra terra. Qui, per esempio, il valore 3^{12} è molto vicino, numericamente a 2^{19} e perciò dodici intervalli di quinta equivalgono circa a sette ottave. Questo fatto sarebbe altrettanto vero anche su quel tal pianeta

che abbiamo immaginato di visitare. Troveremo quindi che gli abitanti di quel lontano mondo, qualora, beninteso, fossero giunti al nostro livello di cultura musicale, userebbero la stessa scala diatonica della quale ci serviamo noi. Però in entrambi i pianeti, il fatto che i due valori non sono identici darebbe luogo a complicazioni; anche quei musicisti extraterreni avrebbero un loro « comma Pitagorico » e potrebbe darsi quindi che anch'essi avessero dovuto compiere lunghi e pazienti studi per ridurre al minimo possibile gl'incresciosi effetti che quel comma origina.

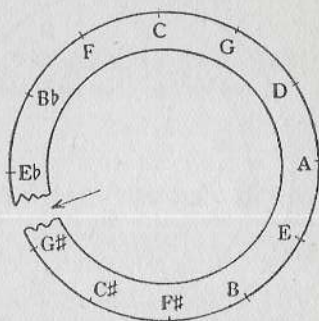
IL TEMPERAMENTO INEQUABILE

La soluzione al problema, che fu adottata per vari secoli, è quella che gli studiosi hanno denominato: « temperamento inequabile ». Sul quadrante delle note, tracciato precedentemente, quattro spostamenti successivi a partire dal DO (picc. ott.), (DO-SOL-RE-LA-MI) ci conducono al MI, una terza sopra il DO. Ora abbiam già visto che il rapporto di frequenza fra il Mi e il DO è uguale a 5,06 nella scala di Pitagora mentre invece il rapporto « gradevole all'udito » (per così dire) è 5,00. La ripartizione delle note, per ottenere la scala di temperamento inequabile venne eseguita diminuendo ciascun dei quattro intervalli: DO-SOL, SOL-RE, RE-LA e LA-MI di quel tanto che porti il rapporto di frequenza, a 5 esattamente, in tutto il settore DO-MI. Ognuno di questi tratti potè essere quindi rappresentato dal rapporto di frequenza $\sqrt[4]{5}$ uguale a 1,49535, invece del rapporto 1,5 che caratterizza una quinta esatta. I due valori differi-

scono di 3,1 su mille e, accumulandosi dodici di tali errori, risulterà una differenza di 37 parti su mille, vale a dire più di 3/5 di un semitono.

Disposta la scala, come la vediamo in fig. 56, l'intervallo SOL♯-MI♭ risultò composto da sette semitoni e due quinti (7 2/5); esso fu denominato dai francesi « Quinte-de-loup » a ricordo dell'ululato caratteristico dei lupi.

Ora, quando in musica si vogliono evitare suoni a carattere di ululato, occorre scegliere con ogni cu-

Fig. 56. - Il « quadrante » delle note » nel « temperamento inequabile ».

ra la nota in chiave al brano musicale. Scostandosi, sia pure di poco, dal temperamento inequabile, fu possibile di disporre le note in modo tale da far sì che una composizione musicale accordata secondo una data chiave, suonasse armonicamente e un'altra, sia pure in chiave differente, suonasse discretamente bene sempreché la chiave appartenesse a un gruppo limitato e con la prima avesse qualche affinità. Per il resto bastava che i musicisti evitassero di comporre o suonare in chiavi troppo diverse; di fatto eran limitati a 3 note acute e due basse, a meno che non si provvedesse a fabbricare appositi strumenti musicali. Vennero, in passato, costruiti organi nei

quali, fra le note RE e MI, erano interposti due tasti neri uno dei quali provocava il suono del RE♯ l'altro quello del MI♭; in seguito anche per varie altre note si fece ugualmente. Così, per esempio, l'organo che Haendel regalò all'ospedale dei Trovatelli disponeva di speciali congegni per sostituire alle canne DO♯, SOL♯, MI♭, SI , altre canne che suonavano le note: RE♭, LA , RE♯, e LA♯, secondo il tracciato che si vede nella fig. 57; purtroppo nessuno è in grado di dirci se queste canne

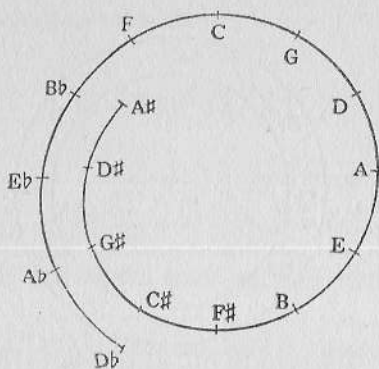



Fig. 57. - Il quadrante delle note nel «temperamento inequabile» con 4 note aggiunte, per poter suonare in differenti tonalità.

si trovavano nell'organo già ai tempi di Haendel, o se pure vi furono aggiunte posteriormente. Infatti di tali canne non si parla che quarant'anni dopo la morte del grande musicista.

Le norme generali che regolano il temperamento inequabile vennero preannunciate da Schlyck nel suo « Specchio del fabbricante di organi e dell'organista » (1511). L'autore propone di far sì che le quinte: FA-DO, DO-SOL, SOL-RE, RE-LA « siano basse quanto l'orecchio può tollerarle » e ciò perchè l'intervallo di terza FA-LA « suoni bene ». Nella sua forma più precisa il sistema sembra sia stato inventato da un musicista spagnolo, cieco, France-

sco Salinas, il quale trascorse quasi tutta la sua vita in Italia. Salinas descrisse il temperamento inequabile nel suo libro « De Musica libri septem » (1577). Gradualmente (ed occorre molto tempo) il sistema fu sostituito da quello denominato « Temperamento equabile ». Le norme che lo reggono si trovano nell'opera di un altro spagnolo, Bartolo Rames, nel suo: « De Musica Tractatus », (Bologna, 1482) in epoca quindi anteriore al Salinas.

IL TEMPERAMENTO EQUABILE

Nel sistema suddetto, l'intervallo detto « comma Pitagorico » viene uniformemente distribuito sui dodici settori che formano il nostro quadrante delle note. Dato che il comma è circa un quarto di semitono, ciò significa ridurre ogni intervallo di quinta di 1/48 di semitono. O, volendo esser più precisi, dato che le dodici divisioni attorno al quadrante stanno a rappresentare esattamente un intervallo di sette ottave, ossia un rapporto di frequenza 128: 1, ogni divisione corrisponderà a un rapporto di frequenza uguale a $\sqrt[12]{128}$ cioè: 1,4983. I semitoni, adesso, sono tutti uguali e, come già spiegato a pag. 44 e seg. ciascuno corrisponde precisamente allo stesso rapporto di frequenza: 1,0587. Per quanto questi valori fossero stati rigorosamente calcolati dal matematico francese Mersenne e pubblicati nella sua opera: « Harmonie Universelle » già sin dal 1636, non sembra che il sistema sia stato praticamente adottato che sul finire del secolo XVII e ciò avvenne nella Germania del Nord. Se ne ebbe la prima applicazione nel celebre organo fabbricato da Arp Schnitger per S. Jacopo ad Amburgo nel 1688-

1692; si dice che l'organo sia stato accordato dal fabbricante stesso pressochè col sistema del temperamento equabile. Ciò avveniva dal 1688 al 92. G. Sebastiano Bach, successivamente, appoggiò caldamente tale sistema e non soltanto volle che i suoi clavicembali fossero così accordati ma scrisse altresì il suo celebre « Clavicembalo ben temperato » per dimostrare che su uno strumento siffatto si possono suonare composizioni in qualsiasi chiave senza che ne sorgano sgradevoli dissonanze. Eppure non gli fu possibile di convertire al suo parere i fabbricanti d'organi suoi contemporanei, tanto è vero che, indubbiamente, gli organi, a quell'epoca, eran tutti ancora accordati col « temperamento inequabile ». Ciò spiega perchè Bach, raramente, nelle sue composizioni per organo, si valga delle chiavi meno usate, al contrario di quanto invece fa quando scrive per il clavicembalo.

Dopo la morte del padre, il figlio, Filippo Emanuele Bach, iniziò una vivace campagna a favore del temperamento equabile, ma ciò non bastò a farlo adottare sollecitamente (almeno in Inghilterra). Fu soltanto verso la metà del secolo scorso che i fabbricanti Inglesi di pianoforti cominciarono ad accordare i loro strumenti secondo quel sistema. Che anzi, fra gli organi di fabbricazione Inglese che si vedevano alla Grande Esposizione del 1851, non ve ne era uno che fosse accordato in temperamento equabile.

Oggi, finalmente, questo sistema è stato universalmente adottato per gli strumenti a tastiera, col grande vantaggio di permettere l'esecuzione di opere musicali in qualsiasi chiave. Ciò non toglie, tuttavia, che il sistema presenti numerosi inconvenienti e, di questi, il più manifesto è che, fra i 78 inter-

valli che costituiscono l'ottava non ve n'è uno solo le cui note siano in perfetto accordo. Che anzi ognuno di essi potrebbe esser migliorato se non dovessimo, così facendo, tener presenti anche gli altri intervalli. Tanto il pianista che l'organista devon sottostare a questo accumularsi di lievi inconvenienti, pur di non intercorrere in guai peggiori rappresentati da intervalli discordi. Invece il violinista e l'artista di canto non hanno preoccupazioni di tal sorta: man mano che un intervallo si presenta, essi sono in grado di aggiustarlo a loro talento e, naturalmente, cercheranno di far sì che esso risulti, auditivamente, gradevole al massimo. In base a numerose osservazioni al riguardo, è stato rilevato che gli intervalli creati dagli esecutori suddetti, (quando suonano o cantano isolatamente) son ben diversi da quelli che essi originano allorchè sono accompagnati da strumenti accordati secondo il temperamento equabile.

LA GIUSTA INTONAZIONE

Nel corso dei tentativi intesi a generalizzare gli intervalli suddetti ebbe origine un terzo sistema denominato: « della giusta intonazione ». Questo si limita ad una sola tonalità e si propone di rendere gli intervalli concordanti al massimo, sia l'uno con l'altro che con le armoniche della nota in chiave.
I numeri di vibrazione prescelti figurano nella tabella a pag. 218.

Desumiamo dai valori della tabella che la maggior parte dei numeri di vibrazione, corrispondenti a consonanze, sono espressi da numeri relativamente piccoli.

D'altronde non tutti i toni sono uguali; alcuni

Nota		DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
Numero di vibrazione	Corrispondentemente al Do	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Corrispondentemente alla nota che precede		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$

noti col nome di « grandi » hanno il numero di vibrazione $9/8=1{,}125$ mentre altri « piccoli » hanno il valore suddetto espresso da solo $10/9=(1{,}111)$. Ai due emitoni corrisponde lo stesso numero di vibrazione $16/15$. Tale valore, tuttavia, è maggiore della metà del numero di vibrazione di un qualunque tono intiero, giacchè $(16/15)^2=1{,}138$. La seconda colonna della tabella a pag. 219 raggruppa gl'intervalli di « giusta intonazione » per la scala del DO.

Le colonne adiacenti dànno le armoniche del DO, SOL, RE, FA e LA, e i corrispondenti intervalli, secondo i sistemi di temperamento inequabile ed equabile. La tabella fa vedere che secondo il sistema della « giusta intonazione » le note, DO, SOL e LA sono propriamente le armoniche del FA; il MI, il SOL e il RE del DO e il SI e il RE del SOL.

Le frequenze rappresentate nella seconda colonna son quelle che verrebbero effettivamente prodotte da un violinista che suonasse in chiave di DO. Se egli, invece, passasse, modulando, in chiave di SOL, il suo LA non avrebbe più $5/3$ della frequenza del DO, bensì $9/8$ della frequenza del SOL, vale a dire $27/16$ di quella del DO. Oltre a ciò la frequenza del suo LA passerebbe da 1,667 e 1,687 volte quello del DO. Vediamo quindi che l'altezza delle sue no-

Nota	Giusta intonazione						Temperam. inequabile	Temperam. equabile
	Scala del DO	DO	SOL	RE	FA	LA		
DO	1.000	1.000	1.031	0.985	1.000	1.042	1.000	1.000
DO♯	—	—	—	—	—	—	1.045	1.059
RE♭	—	—	—	—	—	—	1.070	
DO ×	—	—	—	—	—	—	1.092	
RE	1.125	1.125	1.125	1.125	—	1.146	1.118	1.122
MI♭♭	—	—	—	—	—	—	1.145	
RE♯	—	—	—	—	—	—	1.168	1.189
MI♭	—	—	—	—	1.167	—	1.196	
MI	1.250	1.250	—	1.266	—	1.250	1.250	1.260
FA♭	—	—	—	—	—	—	1.280	
MI♯	—	—	—	—	—	—	1.306	1.335
FA	1.333	1.375	1.312	—	1.333	—	1.337	
FA♯	—	—	—	1.406	—	—	1.398	1.414
SOL♭	—	—	—	—	—	—	1.431	
FA ×	—	—	—	—	—	—	1.460	
SOL	1.500	1.500	1.500	—	1.500	1.458	1.495	1.498
LA♭♭	—	—	—	—	—	—	1.531	
SOL♯	—	—	—	—	—	—	1.563	1.587
LA♭	—	—	—	—	—	—	1.600	
SOL ×	—	—	—	—	—	—	1.633	
LA	1.667	—	1.687	1.687	1.667	1.667	1.672	1.682
SI♭♭	—	—	—	—	—	—	1.712	
LA♯	—	—	—	—	—	—	1.747	1.782
SI♭	—	1.750	—	—	1.833	—	1.789	
SI	1.875	—	1.875	—	—	1.875	1.869	1.888
DO♭	—	—	—	—	—	—	1.914	
SI♯	—	—	—	—	—	—	1.953	2.000
DO ott. ctr.	2.000	2.000	2.062	1.969	2.000	2.083	2.000	

te non si mantiene costante, bensì varia a seconda della nota in chiave al brano che egli sta eseguendo.

I fisici Delezenne e Helmoltz si sono occupati a fondo di tale argomento. Ecco cosa scrive al riguardo il grande fisico e fisiologo di Potzdam: « Dele-

zenne ha dimostrato esaurientemente ed in modo interessante che i più grandi esecutori seguono, suonando, il sistema della « giusta intonazione ». Egli pervenne a determinare, una per una, le note della scala in maggiore, quale venivano suonate da celebri violinisti e violoncellisti (per mezzo di una corda accuratamente calibrata) e constatò così che questi esecutori suonavano esatte terze e seste armoniche. Ebbi la fortuna di fare osservare tal fatto al signor Joachim (1) valendomi del mio armonium. Egli accordò il suo violino, accuratamente, sulle note SOL, RE, LA e MI del mio strumento. Lo pregai quindi di eseguire la scala e, non appena egli suonava una terza armonica o una sesta, io toccavo la stessa nota sull'armonium. Per mezzo di battimenti fu agevole determinare che quell'illustre musicista si valeva del SI$_1$ e non del SI quale terza armonica maggiore del SOL e del MI$_1$ e non MI quale sesta.

TONALITÀ E LORO CARATTERISTICHE

Su uno strumento accordato in temperamento equabile, i semitoni son tutti uguali, cosicchè le scale che rappresentano le varie tonalità differiscono solo in altezza. Per ogni altro riguardo invece esse sono uguali dato che i numeri di vibrazione sono gli stessi in tutte. Ci sarà facile verificarlo incidendo, in disco, una scala cromatica: (DO, DO♯, RE, RE♯, MI... DO) suonata su un piano o altro strumento accordato in temperamento equabile. Facendo poi suonare il disco su un grammofono e aumentando

(1) Il celeberrimo violinista tedesco, direttore d'orchestra e compositore, protetto da regnanti (1831-1907). - N. d. T.

la velocità di rotazione del piatto del fattore 1,0587, il DO diventa un DO♯, il DO♯ diventa un RE e così via, cosicchè quanto udremo sarà la scala cromatica del DO♯.

Su uno strumento non accordato in temperamento equabile, i semitoni non sono tutti uguali, cosicchè un musicista che fosse dotato di un orecchio squisitamente sensibile potrebbe dire: « Questa non è la scala cromatica del DO♯, bensì l'ottava del DO, spostata di un semitono ». Ne segue che in ogni sistema di temperamento che non sia quello equabile, ogni scala ha la propria qualità caratteristica e non si passa da una scala all'altra solo modificando uniformemente l'altezza dei suoni.

Che il temperamento equabile cancelli le qualità caratteristiche delle varie tonalità vien considerato da certuni un difetto. La gravità del difetto dipende da quanto tali differenze (se pure effettivamente percettibili) contribuiscono all'interesse e al diletto che una data musica provoca in noi.

Negli antichi modi della Grecia l'ottava era suddivisa nei suoi sette intervalli per tratti che variavano grandemente da un modo all'altro. Ne risultava che le particolarità dei vari modi emergevano subito e i modi stessi si distinguevano facilmente. Platone ci dice ad esempio che il modo Lidio (il nostro « modo maggiore ») corrispondeva particolarmente al dolore: il Lidio e lo Jonico (ad esso molto affine inquantochè in quest'ultimo il SI♭ sostituiva il SI naturale) erano propri delle cose senza asprezza, del rilassamento, dell'abbandono e persino dell'ebbrezza.

I modi Dorico e Frigio, d'altro canto, evocavano (dice sempre Platone) il coraggio, lo spirito militare, la temperanza e la sopportazione. Per via di ta-

le affinità emotiva, Platone, nella sua Repubblica ideale, avrebbe consentito soltanto l'adozione dei modi Dorico e Frigio ed escluso invece il Lidio e lo Jonico.

I soli modi in uso anche nella musica dei nostri giorni sono il Lidio (modo maggiore) e l'Eolio (modo minore); le loro caratteristiche son facilmente riconoscibili. Vi è stato un tempo nel quale la Chiesa inarcava le ciglia, per così dire, udendo parlare di modo maggiore giacchè non lo considerava abbastanza spirituale per la musica ecclesiastica. Oggi invece siamo soliti consociarlo alla forza, alla virilità, alla gaiezza e persino alla frivolità. Il modo minore evoca, a nostro sentire, pensieri tristi, moventi seri e profondi; tanto è vero che, per via di tale associazione d'idee, l'espressione « in minor key » fa parte delle espressioni figurate nella lingua inglese.

Le diversità esistenti fra le varie ottave maggiori sono molto più sottili di quelle che differenziavano i modi Greci o anche di quelle che intercedono fra le ottave maggiori e minori della musica moderna. Anzichè dipendere dalla differenza fra toni interi e semitoni, esse dipendono sopratutto dalla differenza fra toni « grandi » e toni « piccoli ».

Confrontando due ottave maggiori l'una con l'altra, troveremo che, fatta eccezione per il sistema di temperamento equabile, l'ottava è tuttora suddivisa nei suoi sette intervalli, per tratti di poco differenti. Tutto sta a vedere se tale lieve differenza è percettibile ad un orecchio musicalmente esperto e, in tal caso, se ciò può aver una influenza vera e propria sulle qualità emotive della musica.

Vari musicisti, fra i quali Berlioz, Schumann e Beethoven, a quanto pare, ritenevano che, ad entrambe le domande, si dovesse risponder di sì. Bee-

thoven nei suoi scritti definisce il SI minore « tonalità scura » e descrive Klopstok « sempre maestoso; un vero SOL♭ maggiore ». Beethoven cambia il tono ad una sua composizione onde far sì che la musica sia di genere « amoroso » anzichè « barbaresco » e così via.

Anche Helmoltz, il grande studioso, sembra la pensasse allo stesso modo: ecco come egli scrive:

« Le varie tonalità hanno un carattere ben diverso a seconda si tratti di pianoforti o di strumenti ad arco. Il DO maggiore e il vicino RE♭ maggiore hanno espressioni ben diverse. La differenza non risiede nella diversa altezza, come si può facilmente verificare paragonando due strumenti accordati a differenti diapason. Se il RE♭, su uno strumento, ha la stessa altezza del DO sull'altro, il DO maggiore manterrà, su entrambi gli strumenti, il suo carattere proprio più forte e più vivace e il RE♭ avrà una sua qualità dolce e molle, velata ed armoniosa ».

Sono oggidì numerosi i musicisti che asseriscono di avvertire chiaramente le varie caratteristiche di cui sopra e le consociano alla facoltà emotiva della musica. Essi vi diranno che un brano suonato in DO maggiore — senza diesis nè bemolli in chiave — dà un senso di musicalità virile e forte; suonato in SOL, con un diesis in chiave, avrà un tono più vivace e leggero; un RE, con due diesis, avrà ancor più le caratteristiche suddette. Così potremmo proseguire. Per ogni diesis in più che figura in chiave sembra aumenti la vivacità e il color brillante della musica; invece ogni bemolle aggiunge dolcezza, pensosità ed anche melanconia. Alcuni autori scendono a maggiori dettagli. Ecco, per esempio, una serie di corrispondenze ideali suggerite da Ernst

Pauer e citata nella traduzione inglese dell'opera « Die Lehre v. d. Tonempfindugen... » ecc. di Helmoltz. (Studio delle percezioni sonore ecc.).

DO magg. - Nota evocatrice della purezza e della certezza, esprime l'innocenza, le decisioni energiche, i sentimenti profondi e religiosi.

RE♭ magg. - Dà un senso di sonorità musicale che pervade e riempie.

MI magg. - È consociato alla gioia, alla magnificenza e allo splendore; la più vivace e potente fra le varie tonalità.

MI min. - È indice di dolore, di tristezza, d'irrequietezza.

FA magg. - Dà un senso di pace, di gioia e di luminosità. Rimpianto fugace, sentimento religioso.

FA min. - Acuta pena, melanconia.

FA♯ magg. - Dà un colorito chiaro e brillante al brano musicale.

SOL♭ magg. - Musicalità ricca, molle e delicata.

È chiaro che se anche queste qualità non fossero mai state consociate con le varie tonalità, l'adozione del temperamento equabile le avrebbe fatte sparire. Infatti per esempio: il tono di FA♯ maggiore (sei diesis) è preciso al SOL♭ maggiore (sei bemolli). Eppure quei musicisti che sostengono di avvertire tale rispondenza udendo musica eseguita da un'orchestra, vi diranno di rilevarla pure quando lo stesso brano sia suonato al pianoforte. Gli studiosi di musica sanno di quanti accorgimenti si sian valsi costoro per dimostrare che, anche al pianoforte, le varie tonalità mantengono le pretese caratteristiche e le qualità che, a lor parere, le distinguono. Helmoltz, per citarne uno, dato che la percussione di un tasto nero differisce, meccanicamente, da quella di un tasto bianco (che ha il braccio di leva più lungo) asseriva che l'origine della differenza in questione va attribuita a tal fatto. Non si può negare, effettivamente, che ciò possa influire, ma si tratte-

rebbe di una coincidenza sorprendente se la diversa lunghezza delle leve, provocasse proprio quella tal differenza. È risaputo che le caratteristiche di una composizione musicale, eseguita da un'orchestra, dipendono dal fatto che il brano stesso sia basato, o no, sul temperamento equabile. Ora vien fatto di chiedersi: è mai possibile che la diversità anzidetta fra i tasti bianchi e quelli neri determini proprio le stesse caratteristiche, nella musica per pianoforte?

Tale coincidenza ci sembra talmente improbabile da consigliarci di escluderla senz'altro e ci fa pensare invece che — almeno per quanto riguarda la musica per pianoforte — le qualità proprie alle singole tonalità esistano solo nella mente dell'ascoltatore e, qualche volta, anche in quelle del compositore. Questi, infatti, può aver prescelto la tonalità di una determinata composizione per la rispondenza esistente, a suo modo di vedere, fra quella e certe caratteristiche emotive che egli le attribuisce. A conferma del nostro asserto segnaleremo il fatto che i brani per pianoforte conservano perfettamente la loro particolare qualità emotiva anche quando vengano suonati alla pianola, strumento sul quale ogni diversità meccanica fra i tasti bianchi e neri necessariamente scompare.

Il caso della musica per orchestra non è tale, per sua natura, da poterlo liquidare alla leggera. Si può tuttavia formulare un giudizio, quanto mai logico, sul fatto che coloro i quali asseriscono di percepire certe differenze, nell'esecuzione orchestrale di una composizione, sostengono pure di rilevarle anche al pianoforte e ciò per quanto il temperamento equabile escluda positivamente che tali diversità si manifestino. La riprova di ciò l'abbiamo nel fatto

che queste differenze variano da ascoltatore ad ascoltatore. Abbiamo già fatto rilevare che Platone consociava il nostro tono di DO magg. col dolore, la debolezza e l'intemperanza. Helmoltz, invece, vi trova una rispondenza con l'animazione e la forza; Pauer con la purezza dei sentimenti, con l'innocenza, la virilità e simili attributi. Di nuovo: Helmoltz, nel brano citato, descrive il RE♭ maggiore quale tonalità pastosa, velata ed armoniosa; Pauer, dal canto suo, ci dice che essa è ricca e colorita, sonora e melodiosa.

Tutte considerazioni che fanno pensare alla parte predominante che l'immaginazione soggettiva ha nella rispondenza suaccennata, rispondenza che, in origine, sorse probabilmente da un'associazione di idee. È tutt'una evidente associazione d'idee che ha inizio nei diesis in chiave, rende più acute le note alte e fa sì che la musica fluisca poi chiara, allegra e brillante. Un altro compositore invece, porrà in chiave i bemolli, abbasserà il diapason delle note e sceglierà, di preferenza, note basse che daranno al brano musicale un'intonazione piuttosto deprimente e grave. Naturalmente quanto abbiam detto non arriva a spiegar tutto: possono altresì avere influito, sempre per associazione d'idee, certe composizioni musicali ormai celebri e notissime.

A quanto pare, la potenza dell'immaginazione soggettiva costituisce un fattore di prim'ordine. Taluni ascoltatori giungono persino ad attribuire proprietà emotive alle note, singolarmente considerate. Ecco una lista tolta dalle « lezioni ed esercizi di solfeggio » del Curwen (1).

(1) Standard Course of Lessons and Exercises in the Tonic Sol-Fa Method (1872).

DO (tonalità) — Forte, saldo.
RE — Stimolante, induce alla speranza.
MI — Sostenuto, calmo.
FA — Desolato, terrifico.
SOL — Grandioso, chiaro e brillante.
LA — Triste e flebile.
SI — Penetrante, sensibile.

Ci torna a mente quel grande entusiasta di Beethoven, secondo cui un solo accordo, che dico, una sola semiminima del suo maestro prediletto lo commuoveva molto più di quanto non facesse tutta la musica di Bach, posta assieme.

Qualunque risposta diamo a tali quesiti resta pur vero che l'introduzione del temperamento equabile ha fatto sì che buona parte della musica dei grandi maestri del passato non si sia potuta udire in quel tono nel quale l'autore l'aveva inizialmente concepita. Abbiamo un esempio di ciò nelle composizioni vocali e per organo di Bach e Häendel e in quelle per clavicembalo di Häendel, scritte, originariamente, in temperamento inequabile.

Quanto sinora abbiamo discusso, avrà — confidiamo — posto in chiaro che un sistema perfetto di intonazione non esiste e che non è possibile congegnare una scala musicale che serva ugualmente bene ad ogni strumento. In un'orchestra si possono udir gli ottoni suonare secondo le armoniche, gli strumenti a corda secondo la giusta intonazione (oppure una via di mezzo fra quest'ultima e il temperamento equabile); l'organo, l'arpa, il piano in temperamento equabile. Eppure è raro che sia dato avvertire un qualche disaccordo, eccezion fatta per un concerto di pianoforte, caso in cui il conflitto suaccennato si presenta in forma acuta. Non è sempre

stato così. Scrive, nel 1759, il Dr. Roberto Smith a proposito del temperamento equabile: « quel sistema tutt'altro che armonioso, di 12 semitoni, che produce un'armonia quanto mai aspra e sgradevole ». Più tardi, nel 1852, ecco quanto scrive Helmoltz:

« Quando mi reco dal mio armonium, con la sua giusta intonazione, ad un gran pianoforte, ogni nota di questo strumento dà un suono falso e irritante. All'organo, quando si usi il registro delle combinazioni, e si suonino degli accordi, non si può evitare il rumore infernale che ne risulta. Ma gli organisti lo sanno e si sono adattati al loro destino. Ora ciò è dovuto, sopratutto, al temperamento equabile inquantochè ogni accordo provoca contemporaneamente quinte e terze in ugual temperamento e secondo la giusta intonazione. Ne risulta quel frastuono e quell'orgasmo di suoni confusi al quale alludevamo ».

Lungi dal negare la verità di quanto diceva Helmoltz, ai giorni nostri non siamo più così suscettibili. Può darsi che i nostri orecchi si sian fatti più tolleranti di quelli dei nostri antenati. Abbiamo imparato a tollerare (ed anche a gustare) certe composizioni che a loro apparivano intollerabili; del pari siamo giunti a trovar diletto in certi intervalli, non esattamente intonati, e che per l'udito loro erano « diabolici rumori ».

LA MUSICA DEL FUTURO

Nelle prime pagine di questo capitolo, con un volo fantastico, ci siamo recati a visitare un altro pianeta, gli abitanti del quale avevan raggiunto un livello musicale pari, circa, al nostro. Dato che i

principi della aritmetica si manterrebbero validi anche su quel lontano pianeta, ne concludemmo che quei tali abitanti potrebbero esser giunti ad una scala musicale simile alla nostra, in cui l'ottava fosse suddivisa in dodici parti uguali — o quasi uguali.

Se il cortese lettore è disposto a sbrigliare ancora un po' la fantasia, immagini egli che, sul pianeta che visitiamo assieme, la musica abbia di gran lunga oltrepassato il nostro livello, oppure, volendo essere ottimisti circa la nostra razza, figuriamoci di tornar sulla terra fra qualche migliaio di anni. Vien fatto di domandarsi: qual genere di musica ritroveremmo e, in particolare, quale sarà, la scala allora in uso?

La supposizione più semplice (per quanto non sia detto che debba essere vera) consiste nel pensare che la musica del futuro sia simile a quella del presente, ma intensificata — cioè come oggi avviene, soltanto: più di oggi. Per rendersi conto di quanto ciò implichi, occorrerebbe leggere i nostri libri moderni che trattano di Storia della Musica ed immaginare che persistano e si intensifichino, verso lo stesso odierno orientamento, quelle tendenze che hanno fatto della musica quello che oggi essa è.

Una di queste tendenze tipiche si riscontra nella storia delle quinte consecutive. Certe tendenze o generi musicali che son parsi arrischiati e fors'anche brutti ad una generazione, appaiono invece naturali e belli alla prossima; si ripetono eccessivamente e finiscono per esser considerati banali e noiosi dalle generazioni che seguono. L'orecchio è presto sazio e chiede sempre nuove armonie; però fa presto a prenderle in uggia e, in tal caso, le ripudia, giacchè gli appaiono viete e prive di interesse.

Ci si presenta così, nella storia della musica, una lunga teoria di compositori: Palestrina, G. S. Bach, Beethoven, Liszt, Wagner e Debussy — ognuno dei quali prepara nuovo terreno ai venienti. Che anzi, molti, ai loro giorni, vengon considerati addirittura rivoluzionari e molti altri fra i moderni introducono coraggiosamente accordi nuovi, considerati dapprima azzardati e dissonanti, oggi invece largamente usati nella musica moderna e graditi al nostro orecchio. Non solo, ma le dissonanze imputabili al temperamento equabile, che un tempo tutti riconoscevano, non affliggon più noi moderni come, da quanto abbiam letto nei brani già riportati, sembra avessero tediato i nostri più suscettibili antenati.

Possiamo anche immaginare che, in avvenire, i nostri posteri divengano di giorno in giorno più tolleranti di fronte alle dissonanze. Qualora essi pervengano a uno stadio nel quale qualsivoglia combinazione fra le note della scala attuale sia da essi considerata non solo appena tollerabile ma anche noiosa assonanza, non resterà più alla musica che allargare il proprio campo, vale a dire: aggiunger nuove note alla scala. Si è già presentata, nel campo delle innovazioni, la tendenza a fare esperimenti con i mezzi semitoni — vale a dire quarti di tono — ma, sino ad oggi, non si può dir davvero che i tentativi siano stati coronati da gran successo.

Quest'argomento ci conduce ad un'ulteriore tendenza, che di tempo in tempo, si manifesta nella storia della musica. Vogliamo alludere all'ampliamento della scala che, volta per volta, è stata, prima, pentatonica (5 note), eptatonica (7 note) e finalmente cromatica (12 note). Nelle dodici suddivisioni dell'ottava ha essa raggiunto il suo stadio definitivo op-

pure continuerà tuttavia a suddividersi ulteriormente?

Abbiamo già visto come tale questione interessi l'aritmetico. Senza dimenticare i ben noti pericoli cui si espone chi voglia fare il profeta, ci appare tuttavia che le leggi dell'aritmetica non possano subir mutamenti e che le armoniche naturali non dovranno quindi spostarsi. Vale a dire che di qui a un milione d'anni, come avviene oggi, le loro frequenze saranno doppie, triple, quadruple, ecc., di quella della nota fondamentale. Aggiungeremo altresì che, a meno che non intervengano mutamenti fisiologici nel nostro orecchio, possiamo esser certi che ci saranno sempre graditi, all'orecchio, quegli accordi i cui rapporti di frequenza siano espressi dai più piccoli fra i numeri. A cagione di ciò sembra quanto mai probabile che la nostra quinta, che ha il più semplice fra i numeri di vibrazione (3/2) e la terza maggiore, che ha il più semplice dopo di quello (5/4), figureranno largamente nella musica del futuro. Prima ancora di avanzare ipotesi e congetture circa la scala musicale del futuro, cercheremo di arguire sino a qual punto dovrebbe essere ulteriormente suddivisa l'ottava, onde ne risulti una gamma più ricca e più pura, sotto questo aspetto, dell'attuale.

I QUARTI DI TONO

Per veder di risolvere il problema, immaginiamo dunque — tanto per fissare le idee — che il « comma di Pitagora » anzichè essere un po' meno di un quarto di semitono, fosse stato, precisamente, la metà di questo. In tal caso, dodici quinte non sarebbero equivalse a circa 7 ottave e un quarto di semi-

tono ma avrebbero bensì formato precisamente 7 ottave più un quarto di semitono. Avremmo quindi potuto divider l'ottava in 23 semitoni e, valendoci di un quadrante al modo che abbiam visto a pag. 202, ci saremmo ritrovati, precisamente, al punto di partenza dopo 23 quinte; e queste adesso, formerebbero 14 ottave precise. Avremmo, in definitiva, una scala di 23 note, la quale, data la struttura, risulterebbe in temperamento equabile sin dall'inizio, e abbonderebbe di quinte, esattamente intonate. Se invece il comma Pitagorico fosse stato un mezzo semitono, precisamente, l'esperimento dei quarti di tono avrebbe avuto maggiori probabilità di successo di quanto effettivamente non sia avvenuto. Però, anche in caso favorevole non è detto che così sarebbe stato, giacchè la scala di 23 note non contiene intervalli di terza acusticamente passabili. Infatti il numero di vibrazioni 5/4 equivale a note 7,40 su questa nuova scala, cosicchè la corrispondente terza maggiore andrebbe a cadere, poco propiziamente, fra la 7ª e l'8ª nota della scala.

SCALE PIU' COMPLESSE

Occorre tuttavia non dimenticare che le regole dell'Aritmetica sono quel che sono. Questa rigida Signora ci avverte che 12 quinte equivalgono, sia pure non esattamente, a 7 ottave. Resta a vedere se è possibile sostituire i numeri 12 e 7, nell'equivalenza suddetta, con altri valori più approssimati.

Valendoci delle frazioni continue, troviamo un gruppo di valori che tendono, con crescente approssimazione, al rapporto corrispondente all'intervallo di una quinta e a quello di un'ottava:

$$12 \text{ quinte} = 7 \text{ ottave} + \frac{19}{1000} = 7 \text{ ottave} + \frac{1}{4} \text{di semitono}$$

$$41 \text{ »} = 24 \text{ »} + \frac{16}{1000} = 24 \text{ »} + \frac{1}{5} \text{ » »}$$

$$53 \text{ »} = 31 \text{ »} + \frac{3}{1000} = 31 \text{ »} + \frac{1}{28} \text{ » »}$$

$$306 \text{ »} = 179 \text{ »} + \frac{14}{10000} = 179 \text{ »} + \frac{1}{60} \text{ » »}$$

Non volendo aumentare il numero delle note oltre il valore anzidetto, ciascuna di queste approssimazioni successive rappresenta la miglior suddivisione possibile, cosicchè se il problema fosse inteso esclusivamente a ridurre al minimo il comma Pitagorico, gli estremi degli intervalli di suddivisione, entro l'ottava, sarebbero i punti corrispondenti ai gruppi di note: 12, 41, 53 e 306. Ma il problema non si limita davvero a ciò: quello che noi vogliamo è una scala nella quale abbondino gli accordi di rapporto 5 a 4 (5/4: terza maggiore) e 3 a 2 (3/2: quinta). Ora, nelle varie scale che abbiamo considerato, i numeri di note che costituiscono l'accordo 5 a 4 sono i valori 3, 86, 13, 20 - 17,06 e 98,51, rispettivamente. Perciò, in vista di tale condizione, l'unica scala che sia soddisfacente quanto l'attuale, di 12 note, è quella formata da 53 note. In essa, la nostra quinta, è costituita da un intervallo di 31 note. L'accordo risultando pressochè perfetto; la « terza maggiore » dà un intervallo di 17 note, ed è appena un po' più acuta di un nostro semitono (vi è un settantesimo di differenza).

Gli unici dati storici che abbiamo al riguardo ci dicono che il primo che lanciò l'idea di una scala

comprendente 53 note fu Gherardo Mercatore (1) (1512-1594) celebre matematico, geografo e disegnatore di carte marine. Verso la metà del secolo scorso, vennero fabbricati due armoniums con 53 note per ottava, commessi, l'uno da R. H. M. Bosanquet di Londra, l'altro da J. P. White di Springfield, Massachusetss (U.S.A.) ma i due strumenti destaron solo la curiosità di chi potè udirli.

Abbiamo già compreso che la scala dei nostri tempi, con le sue 12 note, è in stretta dipendenza delle immutabili proprietà dei numeri e da essa trae la sua origine. Quanto nel presente paragrafo abbiamo esposto, ci fa comprendere che la musica dovrà percorrere ancora un lungo cammino prima di venire in possesso di una scala migliore della nostra. Certo si è che con una gamma comprendente 53 note avremmo armonie molto più pure di quanto la scala attuale non consenta. I nostri posteri, probabilmente, riterranno valga la pena di adottarla, malgrado le inevitabili complicazioni a cui ciò porterebbe — sopratutto nel caso di brani eseguiti meccanicamente anzichè con le dita dell'artista — giacchè, in ultima analisi, se le nostre scale sono limitate, ciò è dovuto proprio alle nostre dita, che son soltanto dieci.

E, aggiungiamo noi, se mai la musica potesse non dipender più dalla mano dell'artista, non potrebbe anche avvenire che si adottasse una scala « continua » come avviene oggi col violino, senza accompagnamento? Una scala cioè nella quale ogni intervallo risulti rigorosamente esatto?

(1) Gherard Kremer, o De Cremer, noto per la proiezione « cilindrica » detta appunto: proiezione del Mercatore, usata nel disegno delle carte geografiche. - N. d. T.

CAPITOLO SESTO

LA SALA DA CONCERTO

Abbiamo visto sinora in qual modo i vari strumenti musicali emettano i loro suoni e il perchè della rispondenza fra il timbro di questi e la misura con cui le loro armoniche contribuiscono a formarli. Oltre a ciò abbiamo preso in considerazione gli accordi ed abbiamo visto come essi risultino dalla somma dei vari suoni; poi ci siamo occupati della scelta di una scala musicale che sia, acusticamente, gradevole al massimo, o, per esser più precisi, sgradevole al minimo, beninteso per un orecchio musicalmente educato. Il nostro problema, tuttavia, non si limita alla produzione dei suoni musicali; si estende sino alla percezione di questi da parte del cervello. Dopo che dall'orchestra è partito un suono, esso compie due percorsi successivi: dallo strumento che lo emette sino al timpano dell'ascoltatore e finalmente il percorso che dal timpano lo condurrà al cervello. Questo capitolo e il seguente si occupano, appunto, di queste due tappe del viaggio.

LA TRASMISSIONE DELLE ONDE SONORE

Immaginiamo per un momento di udire un'orchestra le cui melodie ci giungano dalla terra lon-

tanissima, giacchè noi ci troviamo nello spazio cosmico. Ora noi sappiamo già che un mezzo è indispensabile per trasmettere il suono dello strumento ai nostri timpani: figuriamoci per ciò, con un po' di immaginazione, che lo spazio sia riempito tutto di aria atmosferica.

Il suono si diffonde, da ciascun istrumento, sotto forma di onde che si irradiano in tutte le direzioni. Se la loro energia non vien assorbita per via, le onde proseguiranno il loro viaggio ininterrottamente ma, naturalmente, la loro intensità andrà diminuendo man mano che esse avanzano. Nel secondo successivo a quella in cui uno strumento ha emesso un suono, le onde che lo convogliano si trovano al limite di una sfera di 330 metri di raggio; dopo due secondi il raggio diventa 660 metri e così via.

La quantità di energia che si irradia attraverso queste sfere è, naturalmente, unica per tutte ma, dato che la seconda ha una superficie quadrupla della prima, solo un quarto dell'energia stessa attraversa l'unità di superficie della seconda. Ora se un ascoltatore *A* si trova a una distanza di 330 metri ed un altro, *B*, a 660, quest'ultimo percepisce un suono animato da 1/4 dell'energia che invece percepisce *A*. Se poi l'ascoltatore che abbiamo chiamato *A* si allontana gradualmente dallo strumento « trasmittente » l'energia del suono svanirà in modo uguale, vale a dire secondo la legge della inversa proporzionalità al quadrato della distanza. Seguono questa celebre legge la gravità, l'attrazione elettrica, reciprocamente, la repulsione e, finalmente, l'intensità della luce. È la legge che regola l'evanescenza dell'energia in funzione alla distanza.

Ciascuna nota musicale può venir scissa nelle sue armoniche, al modo già visto, e non avviene alcuno

scambio di energia fra di esse durante il tragitto del suono. Perciò, il suono percepito da *B* è assolutamente identico a quello percepito da *A* — per quanto riguarda il timbro — l'unica differenza sarà quindi quantitativa.

Malgrado tutto ciò, sarebbe un errore credere... che la musica udita da *B* sia soltanto una copia fedele ma sbiadita di quella che ode A. Lungo tutto il tragitto, sino al timpano, i suoni sono tutti soggetti alle medesime influenze e la loro intensità si riduce al modo già visto, qualunque sia la loro altezza. L'orecchio invece — come avremo occasione di far comprendere nel prossimo capitolo — non è poi altrettanto imparziale. L'orecchio tratta i suoni diversamente, a seconda della loro altezza. Per esempio, allorchè i suoni son deboli è molto più sensibile agli acuti che non ai bassi, e perciò, man mano che i suoni della nostra orchestra negli spazi si andranno affievolendo, udremo più a lungo gli acuti che non i bassi. Se si trattasse di una banda di tamburi e di pifferi, questi ultimi verrebbero uditi a distanza molto maggiore dei tamburi.

Immaginiamo adesso di ricondurre sulla terra la nostra orchestra. Sorgeranno varie nuove complicazioni fra le quali tre, se non altro, son tali da doverle segnalare.

Il suono anzitutto si irradierà, come prima, in ogni direzione, però una parte di esso sarà proiettata al suolo quasi immediatamente. Ora le onde sonore sono anch'esse soggette alle stesse leggi che governano gli altri moti ondulatori; perciò quando si irradiano verso terra, una parte della energia loro penetra nella crosta terrestre, e viene assorbita. Il resto vien riflesso e si fa una nuova strada in seno all'aria, formando così una specie di eco che parte

dal suolo. Può avvenire quindi che un ascoltatore oda due volte il suono di uno strumento. Infatti, una parte gli giunge direttamente, attraverso all'aria; il resto prima è stato proiettato al suolo, ivi si è riflesso e, finalmente, si sarà fatto strada sino al suo orecchio. Questa seconda parte del suono gli perverrà un po' più tardi della prima a causa del tragitto più lungo percorso. Però, di solito, il ritardo è impercettibile e il suono riflesso parrà servir soltanto di rinforzo alle onde dirette. Anche in questo caso suoni di differente altezza subiscono sorte diversa; però, adesso, sono le note acute quelle meno favorite; il suono dei tamburi, infatti, vien riflesso meglio di quello dei pifferi.

In secondo luogo, alcuni corpi fanno da schermo al suono e lo escludono da certe regioni dello spazio. Sono questi, per esempio, gli alberi e gli edifici. Qui vediamo nuovamente la diversità delle condizioni alle quali sottostanno i suoni di differente altezza: imbattendosi in un ostacolo di dimensioni piuttosto grandi, le onde sonore corte di una nota acuta vengono arrestate definitivamente; quelle invece di una nota bassa, circuiscono l'ostacolo, per riunirsi poi dietro a quello. Si tratta di una proprietà generale delle onde, a qualunque genere esse appartengano. Ne abbiamo un esempio allorchè le onde del mare avanzano verso la riva ed urtano contro i piloni di sostegno del molo. Sulle onde più lunghe sembra che i piloni non abbiano effetto alcuno: esse si suddividono in due bracci, uno a destra e uno a sinistra, per riunirsi subito allorchè hanno oltrepassato i piloni. Invece per le onde più corte e per quelle molto lievi i piloni sono un ostacolo tutt'altro che trascurabile: le onde vengono respinte e si irradiano quindi in ogni senso, come se

fossero sorte in quell'istante. Vien fatto di pensare che l'ostacolo eserciti l'azione di un filtro sulle onde corte mentre le onde lunghe passano tranquillamente. Altrettanto avviene con le onde della luce. Queste però sono infinitamente più corte delle onde sonore: è sufficiente quindi un'ostacolo piccolissimo — quale, ad esempio, un bruscolo di polvere — per trattenere, come in un filtro, le onde corte che formano la luce blu, mentre invece passeranno quelle più lunghe della luce rossa. Ecco perchè il sole ci appare rosso al tramonto oppure allorchè lo guardiamo attraverso ad una cortina di fumo o di polvere. Quella parte di onde corte che riesce a passare è quella che ci fa, di giorno, apparir blu il cielo, o di color vermiglio il crepuscolo. Comunque son sempre le onde corte ad essere intralciate: in acustica corrispondon loro i suoni acuti.

Terza considerazione: una parte del suono si muove, non in seno all'aria, bensì attraverso a corpi solidi: il suolo o il pavimento. In generale le note basse si muovono più liberamente di quelle acute: le meno favorite, quindi, son sempre queste ultime.

Vediamo pertanto che le note acute hanno un grande potere di conduzione negli spazi planetari mentre quelle basse lo hanno sulla terra.

Trasportando l'orchestra in una sala da concerto, risorgeranno le stesse complicazioni, ancor più sensibilmente. Una parte del suono verrà assorbita dai muri, dal soffitto, dai mobili e dagli stessi spettatori; un'altra parte sarà riflessa. Le colonne, poi, il loggione e le sporgenze nei muri intercettano il suono e ne ostruiscono il passaggio. A seconda della loro altezza, i suoni sono soggetti a diverso trattamento e ciò si intende pure delle armoniche che concorrono alla formazione delle note singole, cosic-

chè, spostandosi da un punto all'altro della sala da concerto, variano anche le proporzioni con le quali queste armoniche vengon percepite dall'udito. E, in ultimo, occorre altresì tener conto del fatto che i suoni si diffondono attraverso ai solidi altrettanto bene che in seno all'aria.

Tutte complicazioni, queste, che daranno da fare all'architetto, al costruttore ed al direttore d'orchestra, ai quali spetta il compito di risolvere i problemi che via via si presentan loro, in modo da giovare, anzichè nuocere, alla musica. Si tratta di una questione molto varia e complessa; tanto è vero che se riusciremo, in questo libro, a porre il profano in condizioni tali da comprendere come il professionista affronti e risolva il problema, riterremo di aver già fatto molto!

SUONI ASSORBITI E SUONI RIFLESSI

Per quanto riguarda l'acustica di un ambiente i quesiti di maggiore importanza sono quelli che riguardano la riflessione e l'assorbimento del suono. Abbiamo raggruppato i valori corrispondenti a quella parte dei suoni — suoni di differenti altezze — che viene assorbita, superficialmente, dalle varie sostanze.

I dati esposti nella prima linea non sono, naturalmente, valori dedotti in base a esperimenti fatti ma son bensì suggeriti dal buon senso. È logico infatti che un suono scompaia totalmente, giungendo a una finestra aperta e che nessuna parte di esso venga riflessa. Invece i dati raccolti nelle altre divisioni sono risultati di esperimenti condotti dal Professor W. C. Sabine in America e da altri studiosi della British Building Research Station (Centro Britan-

nico di Ricerche per le Costruzioni) e del National Physical Laboratory (Gabinetto Nazionale di Fisica).

Materiale impiegato	Assorbimento del suono						
	DO (ott. gr.)	DO (ott. pic.)	DO (ott. ctr.)	DO (1ª ott.)	DO (2ª ott.)	DO (3ª ott.)	DO (4ª ott.)
Finestra aperta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Pavimento:							
Parquet di legno, cm. 1,8 in pino, con mastice	—	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Tappeto in lana spesso cm. 1, su pietra	—	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Tappeto di gomma cm. 0,15 su pietra	—	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Muri e soffitto:							
Muro in mattoni cm. 45, nudo	0,021	0,024	0,025	0,031	0,042	0,049	0,07
Muro in mattoni cm. 45, pitturato	0,011	0,012	0,014	0,017	0,020	0,023	0,023
Mattoni forati e stucco	0,012	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
Mattoni forati (West Point)	0,012	0,013	0,018	0,029	0,040	0,048	0,053
Calcina su assicelle	0,048	0,020	0,024	0,034	0,030	0,028	0,043
Idem pitturate	0,036	0,012	0,013	0,018	0,045	0,028	0,055
Cortinaggi a cm. 15 dal muro	—	0,10	0,12	0,25	0,33	0,15	0,35
Pannello a tre strati di teak a cm. 2,5 dal muro	—	0,09	0,17	0,17	0,15	0,15	0,15
Mobilio:							
Strato di pelo dietro a cortinaggio e pegamoide	0,25	0,42	0,47	0,72	0,47	0,27	0,16
Feltro di pelo (unito al 12%)	0,09	0,10	0,20	0,52	0,71	0,66	0,44
Spettatori seduti	0,35	0,72	0,89	0,95	0,99	1,00	1,00

I dati esposti nella seconda fila servono a chiarire gli usi ai quali la tabella è destinata. Vediamo, per esempio, che un parquet di legno assorbe soltanto il 3% del suono di un DO (centr.) e il 22% dello stesso, quattro ottave, più alto. Dato che quella parte del suono che non viene assorbita, vien riflessa, avremo che il parquet di legno riflette il 97% del DO (centr.) e il 78% del DO (4ª ottava). Un calcolo semplicissimo dimostra che dopo 10 volte che vien riflesso, la quantità del suono sarà:

per il DO (centr.) riflesso il 73%; assorbito il 27%
» » DO (4ª ott.) » l'8% » » 92%

e dopo venti volte:

per il DO (centr.) il 54% riflesso; il 46% assorbito
» » DO (4ª ott.) lo 0,7% » » 99,3% »

Per dare un esempio pratico, immaginiamo una stanza completamente rivestita di legno: i muri, l'impianto, il soffitto e il mobilio. Riferendoci al computo suddetto possiamo ritenere che un DO (ott. centr.) debba venir riflesso venti volte e più prima di esser ridotto a metà dell'intensità iniziale; un DO (4ª ott.) sarà considerevolmente ridotto dopo esser stato riflesso circa dieci volte e pressochè spento dopo venti volte. Vediamo perciò che una superficie di legno assorbe le componenti acute di un suono. Ora una sala da concerto, intieramente rivestita di piastrelle di legno di pino di 2 centimetri di spessore è difficile trovarla, per non dire impossibile, ma la tabella ci mostra che anche altre sostanze si comportano allo stesso modo e sono, agli effetti dell'isolamento fonico (assorbimento), anche più efficaci; per

esempio: i tappeti, il feltro (1) e gli spettatori (purchè non sian radi) in particolare. Vedremo in seguito come ciò pure possa costituire un serio inconveniente per una sala da audizioni musicali, in quanto smorza la potenza del suono e ne altera il timbro.

Vediamo adesso un esempio che corrisponde meglio alla realtà dei fatti. Eseguiamo cioè un computo analogo per una sala nella quale i muri e l'impiantito siano in mattoni forati o tavelle e la volta in assicelle di legno e stucco. La tabella ci dice che tali sostanze, a un dipresso, si comportano tutte allo stesso modo, e che i valori medi per l'assorbimento sono i seguenti:

per	DO (ott. piccola)	l'assorbimento	è del	1,2%
»	DO (ott. centr.)	»	» »	1,8%
»	DO (3ª ottava)	»	» »	5,3%

Dopo dieci volte che vien riflesso ecco la quantità di suono residuo:

DO (ott. picc.)	l'89%	riflesso:	l'11%	assorbito
DO (centr.	l'83%	»	il 17%	»
DO (4ª ott.)	il 58%	»	il 42%	»

dopo cento volte:

DO (picc. ott.)	il 30%	riflesso:	il 70%	assorbito
DO (ott. centr.)	» 16%	»	l'84%	»
DO (4ª ott.)	lo 0,4%	»	il 99,6%	»

È facile rilevare come questa sala, acusticamente, differisca da quella che abbiamo descritta prima. In essa la maggior parte del suono — di qualunque al-

(1) Anche migliore dei suddetti, un prodotto modernissimo e italianissimo: la *lana di vetro*, filamenti capillari di vetro. - N. d. T.

tezza — persiste dopo esser stato riflesso dieci volte; dopo cento volte le componenti più acute saranno state assorbite; però le note sino al DO (ott. centr.) si odono ancora con notevole intensità.

RIVERBERO DEL SUONO

Anche se il locale di cui ci occupiamo fosse una specie di cubo di 3 metri di lato, un suono che fosse stato riflesso cento volte di seguito avrebbe in conseguenza percorso 300 metri; il tutto in un secondo circa. In tal modo, qualsiasi nota, più bassa di un DO (centr.) echeggerà, nella sala, per almeno un secondo prima di spengersi. Una voce tenorile, o di basso, la udremo in tutta la sua pienezza dato che le armoniche componenti vengono assorbite pochissimo. Altrettanto non si può dire invece della voce di un soprano, e, fra parentesi aggiungeremo che, se, talvolta, gli uomini, facendosi la barba, si divertono a canterellare nella stanza da bagno, è per via di questa diversità.

Supponiamo inoltre che la saletta, col pavimento di mattoni forati e il soffitto in legno e stucco, sia un cubo di 30 metri di lato. Anche questa volta, il suono si smorza soltanto quando incontra le pareti, e tutte le componenti — eccezion fatta per quelle più acute — potranno venir riflesse circa un centinaio di volte, prima di spengersi completamente; questa volta avran percorso circa 3000 metri e l'intero processo avrà avuto una durata di circa 9 secondi. L'ambiente che abbiamo tratteggiato è considerato eccessivamente sonoro. Il suono della voce (discorsi, conferenze, ecc.) e le esecuzioni di musica sono pressochè inattuabili in esso giacchè, per quanto riguarda l'espressione vocale, mentre chi parla

pronuncia una sillaba, si ode tuttavia l'eco di venti o trenta sillabe precedenti. Per quanto poi riguarda la musica, ogni nota si allunga in una specie di « coda sonora » che dura qualche secondo e nuoce moltissimo alla nitidezza del suono.

Chi si accinge a costruire un locale per conferenze, discorsi oppure concerti dovrà evitare con ogni cura l'eccessiva sonorità. Oggi non è difficile conseguire tale condizione, impiegando materiale che assorba convenientemente i suoni. Tuttavia, eccedendo in tale precauzione, si incorre nel rischio che la musica perda gran parte del proprio colorito, giacchè il materiale impiegato assorbe le armoniche alte assai più di quelle basse (vedi pag. 239).

I fili metallici tesi fra un muro e l'altro, in prossimità del soffitto ed altri accorgimenti che si usavano in passato probabilmente non servono affatto a diminuire l'eccessiva sonorità; ad ogni modo non hanno certamente (per quanto si sappia) una base scientifica. L'accoppiamento fra le corde metalliche tese e l'aria (vedi pag. 164), di solito, deve esser troppo lento perchè i fili metallici possano servire effettivamente al loro scopo; tanto è vero che passando su di essi un archetto da violino non se ne può trarre un suono e ciò dimostra che i fili non sono in grado di mitigare sufficientemente il riverbero sonoro.

SULL'ACUSTICA, IN GENERALE

I vari problemi che abbiamo sinora preso in esame, rappresentano tanti casi particolari di una teoria generale che tutti li comprende. La teoria è dovuta, in massima parte, al prof. M. C. Sabine dell'Università di Harvard e noi cercheremo ora di spiegarla.

A rigor di termini, la teoria si riferisce a un locale molto sonoro; ciò non toglie però che i risultati in base ad essa ottenuti sian validi — almeno con sufficiente approssimazione — per qualsiasi ambiente, purchè, beninteso, non si tratti di un locale « sordo », come si suol dire.

Abbiamo già visto che la musica udita da un ascoltatore in un ambiente sonoro consta di diverse parti; una proviene direttamente dallo strumento musicale, invece le altre — e sono, circa, di ugual intensità — gli perverranno dopo essere state riflesse, una, due, tre e anche più volte. Dato quindi che la massima parte del suono che l'ascoltatore percepisce è stata riflessa varie volte, è indifferente, per quanto riguarda la quantità stessa, che egli si trovi all'estremo anteriore o posteriore della sala, oppure in una delle file intermedie. Illudendosi di udir meglio degli altri, gli ascoltatori inesperti scelgono i posti più vicini all'orchestra. Chi invece s'intende di musica, sceglierà di preferenza un posto in fondo alla sala, relativamente al quale gli strumenti vengano a trovarsi quasi alla stessa distanza e, perciò, in modo che i suoni gli giungano nella dovuta misura. È più probabile, infatti, che una qualche disparità nel volume dei suoni venga determinata da uno schermo (causa di zone d'ombra sonora) che non dalla sola distanza.

La teoria del fisico Sabine, nella sua espressione più semplice, presuppone, che l'energia sonora si diffonda uniformemente all'interno dell'auditorio, in modo cioè che ogni centimetro cubo di spazio ne contenga una quantità uguale. Ora ciò è vero soltanto in una sala molto sonora. L'energia sonora è inconcepibile allo stato di riposo, le onde si muovono alla velocità di 330 metri al secondo e, l'energia stessa, così facendo, si va spengendo. Un efflusso di

suono si riversa continuamente sulle pareti della sala e sugli oggetti di arredo. Se questi elementi riflettessero al cento per cento, non vi sarebbe alcun assorbimento e il suono si manterrebbe sempre allo stesso livello d'intensità. Però siccome nè i muri nè quanto va a formare l'arredo della sala è in grado di riflettere perfettamente, il suono vien continuamente assorbito e finalmente si spenge.

Ciò nonostante supponiamo che le pareti, il pavimento e il mobilio di un dato ambiente riflettano completamente, per modo che non vi sia perdita alcuna per assorbimento. Però supponiamo anche, che nella sala vi sia una finestra il cui vano occupi una superficie di trenta centimetri quadri e che la finestra si apra di colpo. Il suono si effonde immediatamente attraverso ad essa e, una volta uscito, naturalmente, non tornerà più, cosicchè l'energia complessiva del suono, nella sala, andrà, a mano a mano attenuandosi sino a scomparire del tutto.

Quanto durerà, in tutto, il processo di evanescenza? Per un computo preliminare possiamo immaginare un flusso di energia sonora che attraversa il vano della finestra alla velocità di 330 metri al secondo, cosicchè, ogni secondo, a 330 metri cubi di aria, all'interno della stanza, vien sottratta l'energia che, prima, era in essi presente. È logico quindi che se la stanza ha un volume pari a x volte 330 metri cubi, il processo di evanescenza durerà x secondi.

Diciamo subito, tuttavia, che a questo calcolo, poco preciso, occorre apportare due correzioni.

Anzitutto abbiamo supposto che il suono, dall'interno della sala, si sposti direttamente verso la finestra; in realtà si irradia invece in ogni senso. Metà di esso si muove in direzione opposta diametralmente alla finestra: di questa parte occorre quindi non

tener conto. Non solo, ma si può dimostrare che l'altra metà ha una velocità media, *in direzione perpendicolare al quadrato della finestra,* di solo metà del valore precedentemente dato e cioè di 165 metri al secondo. Perciò l'energia sonora sfuggirà attraverso al vano non in ragione di 330 metri cubi al secondo, bensì solo di un quarto di tale valore, vale a dire metri cubi 82,50 al secondo.

In secondo luogo, abbiamo trascurato la continua e progressiva diminuzione dell'energia che resta nella sala. Abbiamo visto che, ogni secondo, va perduta l'energia che si trova in m^3. 82,50, ma occorre altresì considerare che l'energia media per unità di volume va diminuendo, a sua volta, costantemente. Possiamo supporre tuttora che il volume della sala sia x volte 330 metri cubi, vale a dire 4 moltiplicato x volte 82,50. L'energia, quindi, va scemando in ragione di una parte su 4 x della quantità complessiva, al secondo. Se un tale spende, annualmente, una parte su quattro del capitale residuo, può, così facendo, impoverire, ma non resterà mai senza un soldo. Del pari, in quella nostra sala, l'energia sonora non potrà mai essere ridotta a zero. Un calcolo semplicissimo ci fa vedere che essa scemerà sino a raggiungere solo un milionesimo del suo valore iniziale in 13,8 volte il quadruplo di x secondi, cioè 55,2 x secondi.

In luogo di 330 x poniamo la lettera *V*, cosicchè sia *V* il volume della sala in metri cubi; il valore del tempo sarà, circa 1/20 di *V*.

Il tempo che il suono impiega per ridursi a un milionesimo del proprio valore iniziale, vien detto « durata del riverbero » della sala. Potrà sembrare che la scelta del valore $\frac{1}{1.000.000}$ sia piuttosto ar-

bitrario: sta invece a rappresentare la differenza d'intensità fra un rumore fortissimo e uno appena appena percettibile. In altre parole la « durata del riverbero » è il tempo impiegato da un rumore forte e staccato — per esempio un grido e un battimano — a smorzarsi al punto da non essere più udito.

Abbiamo dunque visto che, nel caso di una sala (immaginaria) con pareti e mobilio che riflettano integralmente, sala provvista di una finestra il cui vano sia di 30 centimetri quadri, la « durata del riverbero » è 1/20 di *V*. Se invece le finestre fossero due (uguali fra loro), il suono sfuggirebbe con velocità doppia e quindi la « durata del riverbero » sarebbe ridotta a 1/40 di V. Portando a *n* il numero dei vani aperti, la fuga del suono avverrà con velocità enne volte tanto e la durata del riverbero, dal canto suo, sarà ridotta a $1/20^n$. Otterremmo lo stesso risultato, aprendo una finestra il cui vano abbia una superficie di *n* metri quadrati. Possiamo quindi ridurre a quel valore che preferiamo la durata del riverbero aprendo un numero conveniente di finestre; posto, naturalmente che vi siano effettivamente finestre da aprire!

Ora in una stanza, o sala che sia, ogni metro quadro di parete assorbe dell'energia e così facendo apre uno sbocco alla fuoruscita della energia, alla stessa stregua di una finestra. L'unica differenza, vera e propria, consiste nel fatto che una finestra assorbe tutta l'energia che vi si proietta contro, in quanto la lascia sfuggir tutta, mentre una porzione superficiale di muro ne assorbe solo una frazione: quella, cioè, indicata nella tabella a pag. 221. Dato che il valore di tale frazione dipende dalla altezza del suono, occorre che noi immaginiamo il suono scisso nelle proprie componenti singolarmente. Sup-

poniamo quindi che si tratti della nota DO (ott. centr.). La tabella anzidetta ci dice che 30 centimetri quadri di muro, non pitturato, assorbono 25/1000 (0,025) ossia 1/40 della quantità totale di suono che vi si proietta contro. Perciò m^2 12 hanno lo stesso potere assorbente di cm^2 30 di finestra aperta.

Conveniamo adesso che cm^2 30 di finestra aperta rappresentino il potere di assorbimento unitario. Percorrendo la nostra sala, possiamo fare il conto delle « unità di potere assorbente » rappresentate dai muri, dal soffitto, dall'impiantito e dal mobilio. Chiamando n il numero di queste unità, l'assorbimento complessivo di suono nella sala equivale a quello di una finestra aperta il cui vano abbia la superficie di n volte 30 cm^2. La durata del riverbero corrisponderà a $1/20\ V$, dove V come sappiamo indica il volume in m^3 della sala.

Quando si tratti di suoni di altezza moderata, il legno, lo stucco, i parquets e le finestre a vetro, hanno tutti lo stesso potere assorbente dei muri di mattoni, cioè 1/40, cosicchè una stanza vuota ha un potere di assorbimento complessivo pressochè uguale a un quarantesimo della sua superficie totale in centimetri quadri. Posto che la sala abbia la forma di un cubo e se ne significhi con la lettera f il lato, la superficie totale sarà data dall'espressione $6\ f^2$ e il potere assorbente — che è un quarantesimo del volume — sarà espresso da $3/20\ f^2$. Dato poi che il volume è dato da f^3, la formula $1/20^n\ V$ ci mostra che la durata del riverbero è $1/3\ f$ secondi vale a dire un secondo per ogni metro circa delle dimensioni lineari della sala. Più grande è una sala, tanto maggiore è il riverbero.

Quale primo esempio dell'uso pratico al quale la nostra formula può venir destinata, consideriamo l'acustica di un ambiente quanto mai sonoro: il Battistero di Pisa. Eccezion fatta per i finestroni, l'interno è rivestito tutto di marmo, il cui coefficiente di assorbimento è di circa 0,01. Il Battistero ha un pavimento circolare ed un diametro di circa 30 metri; la volta è a forma di cono, la cui altezza è di m. 53,70. Perciò l'interno ha una superficie complessiva di circa 15.000 metri quadri ed un volume di circa 300.000 metri cubi. Se la superficie interna fosse rivestita intieramente di marmo, il pavimento, le pareti e la volta fornirebbero circa 500 unità di assorbimento e l'ambiente determinerebbe una durata di riverbero di 100 secondi; il suono persisterebbe più di un minuto e mezzo. Nelle condizioni attuali, invece, la cosidetta « eco » dura da 11 a 12 secondi.

	Sostanze impiegate	Area in (m^2)	Assorbimento unitario				
			DO (picc. ott.)	DO (centr.)	DO (1ª ott.)	DO (2ª ott.)	DO (3ª ott.)
Pavimento	Parquet in assicelle di pino cm. 2 con adesivo .	300	50	30	60	90	100
Pareti	Legno teak 3 rivestimenti	700	252	476	476	420	420
Soffitto	Legno e stucco.	300	20	24	34	30	28
Totale delle unità di assorbimento (n)			322	530	570	540	548
Durata del riverbero in secondi $\left(\frac{1000}{n}\right)$ (Eco)			3,1	1,89	1,75	1,85	1,82

Nel Battistero di Pisa, il visitatore può cantare una serie di note, distinta una dall'altra, e udirle poi echeggiare, fuse in un accordo, per vari secondi dopo.

Presentiamo un computo, più particolareggiato, i cui dati si applicano a una saletta da concerto lunga m. 16,65, larga m. 6,65 e alta pure m. 6,65. Il saloncino è sprovvisto completamente di mobilio e non si trova in esso persona alcuna.

Se, invece di lasciar nudo l'interno del saloncino, facciamo occupare metà della superficie del pavimento da persone, dovremo altresì rimpiazzare l'assorbimento dei 150 metri quadri del rivestimento in legno con quello determinato da una uguale superficie di spettatori seduti e il computo ci darà i dati raccolti nella seguente tabella:

	Sostanze impiegate	Area in (m²)	Assorbimento unitario				
			DO (ott. picc.)	DO (centr.)	DO (1ª ott.)	DO (2ª ott.)	DO (3ª ott.)
Impiantito	Spettatori seduti (meno lo spessore delle assicelle: cm. 2 circa).	150	335	430	445	450	450
Parte eccedente del saloncino	(vedi precedente tabella)	—	322	530	570	540	548
Assorbimento totale			657	960	1015	990	998
Durata del riverbero in secondi (Eco)			1,52	1,04	0,99	1,01	1,00

La presenza di spettatori ha ridotto circa a metà la durata del riverbero, come d'altronde avviene quasi sempre in pratica e, per conseguenza, la musica

perde quasi metà della sonorità che avrebbe avuto se l'auditorio fosse vuoto.

Per valerci di un terzo esempio, immaginiamo che il pavimento del salone sia rivestito da un feltro e alle pareti, per metà della loro superficie, siano appese cortine di tela o altra stoffa. I dati del computo che dobbiam fare sono ora i seguenti:

	Sostanze impiegate	Area in (m²)	Assorbimento unitario				
			DO (ott. picc.)	DO (centr.)	DO (1ª ott.)	DO (2ª ott.)	DO (3ª ott.)
Impiantito	Feltro animale .	166,65	50	100	260	355	330
	Spettatori	166,65	360	445	475	495	500
Pareti	Teak a 3 strati .	466,65	126	238	238	210	210
	Cortinaggi	466,65	140	168	350	462	210
Soffitto	Legno e stucco .	300	20	24	34	30	28
Assorbimento totale.............			696	975	1357	1552	1278
Durata del riverbero in secondi...			1,44	1,03	0,74	0,64	0,78

Rileviamo, dalla tabella suesposta, che l'introduzione del feltro e dei cortinaggi ha ridotto ulteriormente la durata del riverbero per i suoni acuti, mentre ciò non si manifesta per quelli bassi.

CIRCOSTANZE FAVOREVOLI ALL' AUDIZIONE

Prima ancora di procedere ad un esame particolareggiato dei dati ottenuti, conviene prendere in considerazione un altro problema: il sostentamento, cioè, di un suono costante, in un dato ambiente; suono emesso, ad esempio, da una canna d'organo,

suonata senza interruzione o da una corda sollecitata, con l'archetto, anch'essa per un certo tempo.

Possiamo supporre che, all'inizio del suono, regnasse, nell'ambiente, un silenzio assoluto. Di lì a poco il suono si diffonderà nel locale, ma, in corrispondenza all'aumento di intensità sonora, dovremo considerare il parallelo e crescente assorbimento del suono da parte dei muri. Giunge così un istante nel quale l'intensità del suono avrà raggiunto un livello massimo, non sorpassabile, dato infatti che, a questo punto, le pareti assorbiranno tutto il suono emesso dallo strumento. Se, per esempio, le pareti rappresentano 300 unità di assorbimento, esse tratterranno circa 82500 metri cubi di energia al secondo e quell'istante di massimo vien raggiunto allorchè l'energia sonora è tale che lo strumento ne produce appunto 82500 metri cubi al secondo.

Supponiamo, adesso, di ridurre a metà l'assorbimento del locale, limitando il numero dei presenti o chiudendo alcune finestre. Le unità di assorbimento sono ora 150 anzichè 300. Cosicchè, quando il suono viene emesso uniformemente, lo strumento che lo genera darà luogo solo a $m.^3$ 41,250 di energia sonora al secondo. Però, dato che si tratta sempre del medesimo strumento, l'emissione del suono, quantitativamente, dovrà esser la stessa. Ne deduciamo quindi che l'unità di volume, a sala vuota, verrà a contenere il doppio di energia sonora di quanta non ne conteneva allorchè la sala era piena; ora che l'assorbimento è ridotto a metà, la sonorità della musica sarà raddoppiata. Se, invece, avessimo ridotto a un quarto l'assorbimento, l'intensità del suono sarebbe stata quadruplicata, e via dicendo. Stabilisce, infatti, una legge fondamentale dell'acustica, che l'intensità del suono di un dato strumento vari,

in ragione inversa al numero che rappresenta le unità di assorbimento. Dato che la legge si applica a qualsivoglia strumento, dovrà esser valida anche per un'orchestra, per una banda e per un qualunque complesso di strumenti musicali. Oltre a ciò, la legge è indipendente dalle varie condizioni nelle quali la sala può trovarsi e si estende pure al caso di diversi locali. Spostando lo strumento (o l'orchestra) da una sala ad un'altra, nella quale l'assorbimento sia metà del primo, il suono emesso avrà intensità doppia.

Rimanendo nello stesso ambiente, l'intensità varia inversamente al numero che rappresenta le unità di assorbimento e, dato che anche la durata del riverbero segue la stessa norma, ne deduciamo che l'intensità sonora è proporzionale alla durata del riverbero. Spostandosi da una stanza all'altra, la sonorità di uno o più strumenti è proporzionale al valore della durata del riverbero, diviso per il volume del locale.

Potremo quindi accrescere l'intensità del suono scemando convenientemente il numero corrispondente alle unità di assorbimento del locale, però così facendo prolungheremo la durata del riverbero e ne risulterà un suono più intenso ma tutt'altro che nitido. Possiamo invece far sì che la musica suoni forte e nitida, senza alcuna coda o ombra sonora, limitando opportunamente la durata del riverbero. D'altronde, per far ciò, occorre aumentare il numero delle unità di assorbimento e, in conseguenza, il suono sarà affievolito.

Avviene, talvolta, che l'intensità costituisca un elemento di scarsa importanza, ad esempio nelle trasmissioni radiofoniche o durante l'incisione di un disco, dato che in tal caso, si provvede elettricamente

ad amplificare il suono. Si suole perciò far uso di pareti molto assorbenti, onde ridurre la durata del riverbero a valori minimi e far sì che la musica o la parola risultino nitidissime per chi ode la trasmissione o il grammofono. Tuttavia, all'orecchio di un ascoltatore che si trovi nella sala stessa, l'audizione del brano musicale non sarà buona, giacchè, come abbiamo visto, riverbero e nitidezza sono elementi contrastanti, agli effetti del suono.

DURATA DEL RIVERBERO E SUO VALORE OTTIMO

Basandosi su una serie di esperimenti, rigorosamente condotti, i fisici Sabine, Watson e Lifshitz hanno potuto calcolare i limiti entro i quali occorre comprendere la durata del riverbero, perchè un'esecuzione sia tale da soddisfare anche il più esigente fra gli ascoltatori. Parliamo, beninteso, di esigenze acustiche. Per motivi tuttora non sufficientemente chiariti, i limiti di durata del riverbero variano da locale a locale e, in massima parte, dipendono dall'ampiezza dell'uditorio. In minor misura dipendo-

Volume del locale (in m^3)	Valore ottimo della durata del riverbero (in secondi)	Unità di assorbimento necessarie per conseguire il valore ottimo della durata del riverbero
3.250	1,03	580
5.420	1,15	870
13.550	1,03	1.920
27.100	1,05	3.300
54.000	1,07	5.900
135.500	1,95	12.800
271.000	2,25	22.200

no anche dal genere della musica o del discorso e variano a seconda si tratti di canto e di musica strumentale a carattere leggero o serio. Nella seguente tabella abbiamo raccolto i valori corrispondenti alla durata del riverbero che è risultata ottima per l'audizione di musica in locali di diverse ampiezze. I valori rappresentano una media fra i dati ottenuti sperimentalmente dai fisici Lifshitz e Watson.

Ambiente	Posti a sedere	Volume (circa)	Durata del riverbero		Valore ottimo della durata del riverbero corrispondentem. alle dimensioni (cft. tabella precedente)
			locale vuoto	locale pieno	
Teatro di lettura della Royal Institution di Londra	640	1.240	1,2	0,7	1,3**
Saloncino del Conservatorio (Mosca)	550	2.400	3,46	1,30	1,5
Camera dei Comuni (Londra)	570	3.400	3,3	1,5	1,5
Gewandhaus (Lipsia)	1500	10.800	3,6	2,3	1,9**
Sala delle Colonne della Camera delle Unioni (Mosca)	1600	12.000	—	—	—
Teatro della Società Eastmann a Rochester (U.S.A.)	3340	21.400	4,0	2,08	2,1

** Questi locali, ottimi acusticamente per i discorsi, non sono mai stati usati per audizioni musicali. Con una certa approssimazione si può calcolare che il valore ottimo della durata del riverbero per discorsi, conferenze ed altro, sia circa l'ottanta per cento dello stesso valore per la musica.

Per porre il lettore in grado di fare un raffronto, riportiamo, nella tabella successiva, la durata del riverbero accertata in diversi saloni ed auditori, giustamente celebri per la loro eccellente acustica.

GRANDEZZA DEL COMPLESSO ORCHESTRALE E SUO VALORE OTTIMO

Il problema della grandezza di un complesso orchestrale (in funzione alle dimensioni di un dato ambiente) è quanto mai simile a quello che abbiamo visto nel precedente paragrafo. Tale problema può apparire superfluo al profano. Raddoppiando il volume di un dato ambiente — può riflettere costui — si raddoppia lo spazio che la musica deve riempire. Quindi la soluzione è semplice: fate sì che l'orchestra sia proporzionale al volume della sala ossia al cubo delle sue dimensioni, linearmente considerate. Lo studioso invece vede nelle unità di assorbimento quasi altrettante bocche affamate di suono e che occorre saziare. Egli, quindi, vorrà piuttosto che l'orchestra sia in proporzione alla superficie del locale, anzichè al volume o al cubo delle sue dimensioni, linearmente considerate. Nelle aule spaziosissime, nelle Chiese ed altri ambienti molto sonori l'elemento assorbente è costituito in massima parte dalle persone presenti cosicchè il complesso degli strumenti deve essere proporzionale al numero degli intervenuti. Gli antichi fabbricanti di organi seguivano la regola di porre una canna in corrispondenza a ciascuna persona presente. Regola empirica, se vogliamo, ma scientificamente giustificabile.

Per ottenere i migliori risultati, entro una determinata sala, occorre tener presente che l'orecchio tollera (e in certi casi richiede) maggior riverbero sonoro in un ambiente vasto che non in uno di minori dimensioni. A pagina 256 seconda colonna, sono stati raccolti i dati corrispondenti al valore ottimo della durata del riverbero, in funzione delle dimensioni di varie sale. In base ad essi è facile cal-

colare il numero delle unità di assorbimento che occorrono perchè la durata del riverbero assuma appunto il suo valore ottimo. I dati relativi al numero delle unità di assorbimento necessarie, sono raccolti nell'ultima colonna.

Si dimostra, sperimentalmente, che un comune strumento orchestrale può emettere un volume di suono tale da sopperire a 200 unità di assorbimento. Qualora queste fossero in numero superiore, lo strumento non sarà più in grado di dare un « fortissimo »; se invece fossero in numero inferiore, suonando lo strumento con la massima intensità la musica che ne risulta sarà eccessivamente intensa. Per conseguire quindi i risultati migliori, un'orchestra dovrebbe contenere uno strumento per ogni 200 unità di assorbimento. Date le dimensioni dell'auditorio, per ottenere il numero degli strumenti di un complesso che poi risulterà il migliore, basta dividere per 200 i numeri dell'ultima colonna a pagina 256. I risultati appaiono già elencati nella 2ª colonna della seguente tabella. La terza colonna, invece, ci dà lo stesso valore in base ai computi ed agli esperimenti di Heyl.

Volume (in m^3)	Numero degli strumenti	
	Computo in base alla precedente tabella	Secondo Heyl
340	3	—
566	4	—
1416	10	10
2831	17	20
5662	30	30
15155	64	60
20648	90	90
28310	111	—

In tutti i calcoli che hanno condotto ai dati in tabella, abbiamo supposto che, nel complesso orchestrale, le varie categorie di strumenti fossero equamente rappresentate (strumenti a corda, a fiato, a percussione, voci alte, basse e via dicendo).

LA SALA DA CONCERTO IDEALE

Ci siamo sinora occupati del fattore « quantità del suono »: vediamo ora un altro elemento quanto mai importante agli effetti di una buona esecuzione: la qualità del suono. Due saloni da concerto possono anche essere identici per il volume e la forma loro, eppure la musica risultare colorita, brillante e vivacissima nell'uno, fioca e smorta nell'altro. Nel primo locale gli esecutori suonano con anima e fanno, come si suol dire, un figurone; nel secondo invece, non si sentono incoraggiati dal pubblico e, cosa strana, non si sentono « in forma » loro stessi. A cosa attribuire tale diversità?

In parte essa è dovuta alla diversa durata del riverbero sonoro, nelle due sale. Dato che la sonorità della nota emessa da uno strumento è proporzionale alla durata del riverbero, se questo è piuttosto sensibile, ciò provoca negli esecutori un senso gradevole di capacità, spontanea, quasichè la sala li sostenesse. A ciò si aggiunge un certo smussamento delle asperità ed ineguaglianze che posson sorgere dalla forza che a volte occorre, in contrasto con le esigenze del « tempo » di un dato brano. Una durata di riverbero molto limitata (poca sonorità dell'ambiente) provoca, nell'esecutore, la sensazione penosa di chi si sforza, senza conseguire il voluto effetto. Si direbbe che la musica abbia appena il tempo di mostrare, a nudo, i propri difetti per cessare di lì a

poco. Altre e non meno importanti differenze sorgono dal variare della durata del riverbero sonoro in funzione all'altezza delle note emesse.

Le tabelle a pag. 252 e 253 riportano alcuni dati relativi all'acustica di due ambienti (immaginari) di dimensioni uguali. Il primo potrebbe chiamarsi « sala di legno » e l'altro « sala di feltro e di stoffa ». Attenendosi a una media fra le varie altezze di suono, le durate del riverbero nelle due sale non sono poi molto differenti; entrambe si avvicinano assai al valore ottimo (1,15 secondi) per un ambiente di tali dimensioni. Se invece non ci atterremo a una media fra le varie altezze del suono, rileveremo una grande diversità fra i valori della durata del riverbero, corrispondentemente al diapason. Nella sala che abbiamo denominata: « di legno » tutte le note sopra al DO (ott. picc.) hanno, a un dipresso, la stessa durata di riverbero. Perciò le note, siano basse o acute, purchè animate da uguale intensità, risuoneranno, nell'ambiente, parimente sonore. Vediamo quindi che in questo caso le note di diversa altezza si compensano. Altrettanto non avviene, invece, nella sala che abbiamo chiamato « di feltro e di stoffa » dove le note alte hanno una speciale durata di riverbero particolarmente breve; i suoni sono fiochi e smorti, cosicchè la musica finirà per perdere quel colorito e quella vivacità che invece le occorrono. Si potrebbe ovviare a questo inconveniente aumentando, convenientemente, il numero degli strumenti per la parte melodica, ma si tratta di un rimedio poco efficace. Non basta, infatti, considerare alla stregua di altrettante « unità » le note; occorre bensì approfondire l'analisi e vedere in ogni nota, l'insieme di tutte le armoniche che concorrono a formarla. La sala « di legno » tratta tutte le

armoniche, sovrastanti al DO (ott. centr.), alla stessa stregua: perciò il cosidetto « timbro » o qualità caratteristica del suono, che dipende dalla misura con cui le varie armoniche contribuiscono a formarlo, non vien turbato per via del riflesso sonoro. Altrettanto non si può dire della « sala di feltro e stoffa », la quale soffoca, per così dire, le armoniche alte ed altera quindi il timbro del suono, di solito peggiorandolo. Abbiamo già visto che il suono di uno Stradivario differisce da quello di un mediocre violino moderno, in massima parte per la ricca dotazione di armoniche alte che possiede. La sala « di feltro e stoffa », sottraendo allo Stradivario tali componenti canore, farà sì che il suono ci appaia simile a quello di un violino di poco conto. Nel suono dell'oboe si odono, almeno, otto armoniche, la più alta delle quali conferisce al suono quel timbro sottile, flebile, fra lo stridulo e il dolce. Togliendogli queste caratteristiche il suono perde risalto, si appiattisce. Aggiungeremo pure che qualunque strumento darà un suono siffatto quando sia privato delle proprie armoniche e ne risulta quindi una monotonia di suoni che non giova certo all'esecuzione. Lo stesso dicasi dei registri diapason, viola da gamba e clarini nell'organo.

Volendo quindi che la sala da concerto possieda una buona acustica e che l'esecuzione sia buona, provvederemo a rivestirne l'interno con sostanze che non sottraggano ai suoni le loro armoniche superiori. Si trovano oggi sul mercato vari tipi di rivestimenti che, pure assorbendo convenientemente il suono (laterizi speciali, sughero granulare compresso e lana di vetro) evitano l'inconveniente suddetto. Come si vede nella tabella a pag. 241 anche i comuni pannelli di legno posson servire allo scopo, da-

to che assorbono indifferentemente una parte del suono, a prescindere dall'altezza. Caso mai il legno ha delle parzialità per i suoni a frequenza elevata e, pertanto, sottolinea il carattere brillante di certi brani musicali. Perciò viene impiegato di frequente.

Assume un'importanza particolare, agli effetti acustici, il problema del rivestimento del soffitto e delle zone alte della sala. Anche trattandosi di ambienti molto acustici, nei quali il suono vien riflesso decine (per non dire centinaia) di volte prima di divenire impercettibile, la maggior parte di quanto udiamo ci vien recato da onde sonore che, o son giunte direttamente, o sono state riflesse poche volte. Per comprendere tale fatto, supponiamo che l'interno della nostra sala sia completamente rivestito di una sostanza che trattenga un terzo del suono irradiatovi e rifletta, per due terzi, i residui. In una sala siffatta il suono, prima di scomparire del tutto vien riflesso non meno di 34 volte, eppure, di quanto udiamo, un terzo ci giunge direttamente, dallo strumento, ed altri due noni (vale a dire 5/9 complessivamente) sono stati riflessi solo una volta. Concorre solo per 1/5, quella parte di suono che sia già stata riflessa più di tre volte. Concludiamo dunque che il fattore massimo, agli effetti del nostro udito, è costituito da quella parte di suoni che non è mai stata riflessa e quella che lo è stato solo una volta o due. In una comune sala da concerto, l'impiantito, quasi sempre, vien coperto di materiale molto assorbente ed è inoltre occupato dagli ascoltatori (abbiamo già visto la loro proprietà, acusticamente); perciò il suono che udiamo non essendo, almeno in gran parte, ancora giunto al suolo, il riverbero del soffitto e delle pareti acquistano la massima importanza.

Perchè una sala sia molto sonora occorre che i muri e il soffitto siano di struttura massiccia, compatti e lisci, giacchè son proprio questi, in definitiva, i caratteri favorevoli alla riflessione del suono.

Ora, per quanto ciò non costituisca lo scopo precipuo del nostro libro, diremo anche che le stesse considerazioni si applicano alle stanze destinate ai discorsi. In base ai dati riportati dalle tabelle scorse, risulta che una stanza ha meno unità di assorbimento di una sala e che perciò il riverbero di cui è capace, favorirà più la voce di un basso e di un tenore che non quella di un soprano. Perciò occorre uno sforzo minore per colmarla con le note di un basso anzichè con quelle di un soprano. Per quanto riguarda il consumo di energia, una stanza siffatta si presta meglio ad un conversatore maschile, purchè questi tenga presente che egli avrà a che fare con una durata di riverbero, maggiore per lui che per una voce femminile. Parli perciò meno forte. Si dice, di solito, che una stanza ha un certo « diapason » e che un conversatore si ode agevolmente non appena egli accordi la propria voce col « diapason » di quella stanza. Chiunque abbia una certa dimestichezza con i conversatori e con i discorsi in generale, dovrà riconoscere che c'è del vero, in quanto abbiamo detto. Il « diapason », probabilmente, rappresenta una certa frequenza alla quale corrisponde un minimo di assorbimento e un massimo di durata del riverbero. Alcuni spiegano il fenomeno asserendo che il diapason suaccennato corrisponde a una delle vibrazioni libere del volume dell'aria in quella stanza, ma non sembra che la spiegazione sia valida e ciò per vari motivi.

Prescindendo dalle sostanze impiegate nell'arredamento e nella decorazione, anche la forma della

stanza influisce grandemente sulle sue prerogative agli effetti di un concerto. Abbiamo già detto che le note basse, di frequenza inferiore, girano attorno agli angoli e riescono facilmente a circuire gli eventuali ostacoli. Le note acute invece non sono in grado di far ciò, altrettanto facilmente. Ecco perchè, ad un ascoltatore seduto in un angolo o che si trovi dietro uno schermo, può darsi che le note giungano prive delle loro armoniche superiori. Sarà quindi più conveniente, per l'esecuzione di musica, quella stanza o sala ove non siano angoli molto pronunciati, grosse sporgenze o schemi che si frappongano comunque al suono.

L'architetto dovrà altresì preoccuparsi di varie altre questioni di indole pratica. Per esempio: una volta a pieno centro o comunque ricurva può riflettere i suoni facendoli convergere in un sol punto o lungo una determinata linea, ove si udranno con eccessiva intensità. Perchè ciò non avvenga occorre che tali zone di convergenza, qualora si presentino, vengano a trovarsi a discreta distanza, sopra o sotto, dall'orecchio degli ascoltatori. Un soffitto a cupola può essere, agli effetti del suono, altrettanto assorbente quanto una finestra aperta di uguale base, dato che il suono, una volta giunto in quella regione, potrà uscirne soltanto dopo aver subìto numerose riflessioni. Queste lo avranno talmente indebolito da renderlo pressochè inaudibile. Se pure è tuttavia percettibile, può aver perduto tanto tempo nella cupola da non esser più che un'eco, sconnessa dal corpo del suono e tale quindi da confondere il pensiero musicale. Lo stesso vale, in massima parte, per le nicchie nei muri, per le alcove e per le cavità o insenature in genere.

Il suono ha pure la tendenza di aprirsi una via in seno ad altri mezzi, che non siano l'aria e anche questa particolarità va tenuta nella debita considerazione, per quanto occorra riconoscere che non sempre è dannosa. Nel Gewandhaus, a Lipsia, l'orchestra si trova su un podio connesso ai riquadri della sala per mezzo di massiccie travi di legno. In tal modo le pareti dell'edificio fungono da cassa armonica, con ottimi risultati.

CAPITOLO SETTIMO

L'UDITO

Ci siamo sinora occupati della nascita del suono e di come, in seno all'aria, venga trasmesso all'orecchio: resta ora a vedere come lo percepisce il nostro organo auditivo e come, dal timpano, pervenga finalmente al cervello.

Allorchè un'onda sonora attraversa l'aria, la pressione ambiente varia secondo un certo ritmo: in certi punti è superiore, in altri inferiore alla normale pressione atmosferica. Avviene cioè un fenomeno analogo a quello determinato dal diffondersi delle ondulazioni su uno specchio d'acqua tranquilla. La altezza del livello acqueo varia secondo un certo ritmo, radialmente; in dati punti è sopra, in altri è sotto al normale livello dell'acqua. Altrettanto avviene in quello straterello d'aria che si trova a contatto con la membrana del timpano: le variazioni di pressione in questo strato determinano la sensazione auditiva. Quanto più grande è la variazione, tanto più intensa è la percezione; abbiamo visto infatti che l'energia che anima un'onda sonora è proporzionale al quadrato della variazione di pressione.

Le variazioni di pressione con le quali abbiamo maggior familiarità, son quelle del barometro — per esempio da 76 e 75 centimetri nella colonna del

mercurio o viceversa. Le variazioni di pressione corrispondenti al propagarsi del suono sono di gran lunga inferiori. Tanto è vero che è stata necessaria l'introduzione di una nuova unità di misura: la « baría ». Per esigenze puramente scientifiche tale unità vien definita come la pressione di una dina per centimetro quadrato. Ai nostri lettori tuttavia basterà sapere che una baría è, a un dipresso, la milionesima parte della pressione atmosferica, complessivamente considerata. Spostando verso l'alto il livello dei nostri orecchi di circa 8 millimetri, la pressione che si esercita sulla membrana del nostro timpano varia di una baría; allorchè ci giunge all'orecchio un suono musicale piuttosto forte, la variazione è ancora di una baría.

LA SOGLIA DELL'UDITO

Supponiamo ora di allontanarci, progressivamente, da un punto, nel piano, e che da quello, come da un centro, venga irradiata una nota musicale, ininterrottamente emessa. Data la progressiva diminuzione dell'energia che stimola il nostro orecchio, potremmo supporre che andasse proporzionalmente diminuendo anche l'intensità del suono percepito dal cervello. Eppure non è così: il suono diminuisce per un certo tempo, poi, improvvisamente non si ode più. Ciò dimostra che l'intensità del suono non è proporzionale all'energia che impressiona il nostro orecchio: se il valore dell'energia scende al disotto di un certo livello non udremo più nulla. Il valore corrispondente a quel minimo di intensità sonora, necessaria e sufficiente a impressionare il nostro orecchio vien denominata « soglia dell'udito ».

Percuotendo il rebbio di un diapason e lasciando poi che le vibrazioni si smorzino sino a tacere, abbiamo una prova che tale « soglia » esiste. Giunge infatti ben presto un istante in cui l'udito non avverte più suono alcuno. Eppure le vibrazioni del rebbio sono ancora in atto e il suono viene tuttora emesso. Lo si può provare, infatti, premendo l'impugnatura del diapason contro una superficie piuttosto ampia e resistente, quale ad esempio, il piano d'un tavolo, a un estremo. Questi fungendo da cassa armonica, amplificherà il suono al punto di poterlo nuovamente udire. Senza l'ausilio della cassa armonica, l'intensità del suono sarebbe stata sotto alla « soglia dell'udito ». Amplificandola l'abbiamo ricondotta sopra a quel limite.

L'esistenza di questa « soglia » pone l'udito alla pari con gli altri sensi; anche nel campo delle altre sensazioni il nostro cervello non è in grado di percepire alcunchè sino a quando lo stimolo non giunga a quella tale « soglia » di intensità. Quella della vista, per esempio, riveste una particolare importanza in astronomia: i nostri occhi, infatti, riescono a scorgere le stelle sino a un certo limite di lucore (stelle di grandezza circa 6,5) ma al di là di tale valore, non vedono più nulla. Con l'ausilio della cassa armonica si può portare l'intensità del suono oltre la soglia dell'udito e così un telescopio porta il debole lucore di una stella lontana oltre la soglia della vista.

Vien fatto, naturalmente, di chiedersi qual sia la quantità minima di energia che, sollecitando il nostro orecchio, giunga a impressionare il cervello. In altre parole, quant'è l'energia che si fa sentire attraverso ai nostri orecchi, alla soglia dell'udito?

La risposta dipende, in massima parte, dall'altezza del suono che ci interessa. A un certo punto dell'ultima ottava del pianoforte vi sono alcune note per le quali la sensibilità del nostro orecchio è massima. In questo tratto di frequenza è sufficiente una quantità minima di energia sonora per determinare la percezione auditiva. Per le note immediatamente sopra o sotto a quella, l'orecchio non è più così sensibile ed occorre quindi maggior energia per provocare la stessa sensazione. Oltre queste note ve ne sono altre di diapason o molto alto o molto basso, per udir le quali occorre un grande dispendio di energia. Finalmente, dopo queste ultime esistono frequenze che non vale energia alcuna a trasformare, per noi, in suono, giacchè esse son situate in una zona al di là dei limiti dell'udito.

La tabella seguente contiene dati ottenuti sperimentalmente da Fletcher e Munson. Nelle prime due colonne sono raccolti i dati relativi all'altezza e la frequenza delle note di cui abbiamo parlato; nella terza la variazione di pressione che è necessaria per provocare la sensazione auditiva. L'ultima colonna contiene i valori corrispondenti alla quantità di energia occorrente a quella data altezza, in funzione di quella occorrente alla frequenza del FA (3ª ott.) dato che per questa l'energia necessaria è minima.

Desumiamo, dalla tabella, che, per sollecitare l'orecchio, basta una variazione anche minima di pressione purchè la nota abbia una frequenza compresa entro certi limiti. Per esempio: lungo l'ottava

(1) Anche Andrade e Parker (1937) hanno accertato una serie di valori in perfetto accordo con quelli di Fletcher e Munson. - N. d. T.

Nota	Frequenza	Variazioni di pressione occorrente per la sensazione uditiva	Quantità di energia in funzione del valore minimo
DO (canna d'organo m. 9.60; in prossimità dei limiti estremi dell'udito)	16	100 barie	1.500.000.000.000
LA (controttava, ultima nota del piano)	27	1 baria	150.000.000
DO (controttava, ultima del piano a sinistra)	32	$\frac{2}{5}$ »	25.000.000
DO (grande ottava)	64	$\frac{1}{40}$ »	100.000
DO (piccola ottava)	128	$\frac{1}{200}$ »	3.800
DO (ottava centr.)	256	$\frac{1}{1000}$ »	150
DO (1ª ottava)	512	$\frac{1}{2500}$ »	25
DO (2ª ottava)	1.024	$\frac{1}{5000}$ »	6
DO (3ª ottava)	2.048	$\frac{1}{10000}$ »	1,5
FA (3ª ottava) massimo per la sensibilità uditiva	2.734	$\frac{1}{12500}$ »	1,0
DO (4ª ottava) estremo a destra del piano	4.096	$\frac{1}{10000}$ »	1,5
DO (5ª ottava)	8.192	$\frac{1}{2000}$ »	38
DO (6ª ottava)	16.384	$\frac{1}{100}$ »	15.000
In prossimità dei limiti dell'udito umano	20.000	500 barie	38.000.000.000.000

estrema, a sinistra del piano basta, pertanto, un decimillesimo di un'atmosfera; come già abbiamo visto tale variazione è prodotta da uno spostamento d'aria corrispondente a meno di mm. $25/10^{10}$. Questo valore a sua volta è solo un centesimo del diametro di una molecola.

Rileviamo anche entro quali vasti limiti siano compresi i valori che figurano nell'ultima colonna. I nostri orecchi, sensibilissimi alle note comprese nelle due ultime ottave del piano (acuti) sono invece quasi sordi, al confronto, per i suoni che si trovano molto sotto o molto sopra a questo intervallo. Così, ad esempio, per rendere audibile una nota DO (ott. dopo la controttava; non esiste nel pianoforte) occorre una quantità di energia un trilione di volte maggiore di quella occorrente per trasformare in suono una nota che sia sette ottave più alta.

La struttura di una normale canna da organo ci da conferma del fatto. Così, ad esempio, la canna di frequenza DO (dopo la controttava) è enorme giacchè misura ben m. 9,60 di lunghezza. È dotata di un'apertura, al piede, che assorbe una considerevole quantità d'aria eppure dà un suono che certamente non è più intenso di quello emesso da una piccola canna, lunga 7 centimetri e mezzo, degli acuti. Basta il fiato di un bambino per far suonare quest'ultima, mentre tutta la forza di cui dispongono i polmoni d'un uomo, non perverrà a strappare un suono percettibile alla canna del DO dopo la controttava, quella che, come abbiamo visto, è lunga nove metri e sessanta.

Ciò per quanto riguarda la quantità minima di suono, capace di darci una sensazione auditiva; vediamo ora invece quale sia la « differenza » minima di suono necessaria a determinarla.

In altre parole: quale incremento dovremo dare a un suono perchè l'orecchio ci informi che esso è divenuto, percettibilmente, più intenso?

Per rispondere a questa domanda, faremo un esperimento. Useremo cioè due diapason elettrici, ognuno dei quali venga provvisto di un indice che ci segnali la quantità di energia spesa nel corso della vibrazione.

In un primo tempo, forniremo la stessa quantità di energia ai diapason; udremo, in conseguenza, due suoni di eguale intensità, quando essi ci giungano distinti. Seguitiamo a far suonare, a vicenda, i diapason, ma facciamo aumentare frattanto la quantità di energia provvista a uno di essi. Dapprima non rileveremo differenza alcuna nell'intensità dei due suoni, giacchè occorre un po' di tempo perchè l'un diapason vibri più fortemente dell'altro. Di regola, la differenza si farà sentire quando l'energia che anima il suono più intenso supera del 25% quella del più debole. Deduciamone quindi che il nostro orecchio non avverte la percezione risultante da una variazione di energia inferiore al 25%. Al pianista che esegue un passaggio rapido è consentita una variazione del 25% nella forza con la quale esegue le varie note senza che l'ascoltatore rilevi alcuna irregolarità. Anche l'orecchio più educato musicalmente, non riuscirà a cogliere differenza alcuna se fra le canne d'organo che compongono una

fila, intercede una differenza del 25% nella forza con cui vengon suonate.

Se ora aumentano la quantità di energia fornita ad entrambi i diapason, anche in ragione di 100 o 1000 volte la primitiva, e ripetiamo l'esperimento, riscontreremo che è tuttora necessario si manifesti una differenza del 25% prima che il nostro orecchio avverta alcunchè. Perchè l'incremento di intensità si manifesti in forma sonora e percettibile non basta l'aggiunta complessiva di una certa quantità di energia: occorre aggiungerla in certa misura. Non si tratta quindi soltanto di addizione: occorre piuttosto moltiplicare per un certo fattore. Possiamo infatti suddividere l'intiera scala delle intensità di suono in un certo numero di intervalli distinti, in modo tale che ciascuno di essi sia, auditivamente, più intenso del precedente, *solo di quel tanto che basta a farcelo avvertire*. Ebbene: troveremo che ciascun intervallo corrisponde ad un incremento di energia superiore di circa il 25% al precedente.

Quanto abbiamo detto illustra una legge generale, enunciata per primo da Weber: « L'incremento minimo di stimolo percettivo, atto a produrre un aumento sensorio tale da essere avvertito, è proporzionale allo stimolo che immediatamente lo ha preceduto ». Si tratta naturalmente di una legge solo approssimativa, che non si presta neanche ad esser rigorosamente saggiata, giacchè si basa su sensazioni necessariamente soggettive, e quindi variabili. Anche nel caso semplicissimo che abbiamo esposto, si sa che tale legge non si può applicare con la precisione che sarebbe richiesta. Per esempio: il nostro udito è quanto mai inerte di fronte a variazioni di intensità nel campo dei suoni molto deboli. Allorchè un suono possiede soltanto una quantità di ener-

gia dieci volte superiore a quella di cui è dotato alla « soglia dell'udito », occorre una variazione di intensità che sia doppia, proporzionalmente, di quella che gli occorre, per farsi udire, quando sia piuttosto forte. Come si vede non si tratta più di un incremento del 25%, bensì del 50%. Per i suoni ancor più deboli oppure per note straordinariamente alte o basse, le percentuali suddette subiscono mutamenti ancor più notevoli.

Taluni esperimenti, condotti recentemente dai Prof.ri Churcher, King e Davies indicherebbero che non esistono limiti alcuni entro i quali la legge sia rigorosamente applicabile. Aggiungeremo pure che, mentre è sufficiente una variazione del 25% per impressionare il nostro udito, tale valore scende sino al 10% quando gli esperimenti vengano condotti fra le pareti di un gabinetto di acustica, ambiente ideale per esperimenti del genere. Tuttavia, malgrado le precedenti riserve, resta acquisito il fatto che, in condizioni normali e in un campo di frequenze e di intensità piuttosto vasto, l'incremento minimo di sonorità che si renda percettibile all'udito è del 25% circa.

Per operare dieci di tali incrementi occorre portare l'energia sonora a raggiungere un valore che sia ($1{,}25^{10}$) volte l'iniziale. Il valore di questo numero è dato dalla frazione $\frac{9.765.625}{1.048.576}$. Ponendo, per un momento, tale grandezza uguale a dieci, diremo che decuplicando l'energia (per esempio portandola da una a dieci unità) percorreremo dieci divisioni nella scala delle intensità. Se poi volessimo effettuare nuovamente un uguale aumento di intensità dovremmo percorrere altre dieci suddivisioni e per ciò dovremmo decuplicare nuovamente l'energia sonora,

vale a dire portarla da 10 a 100 unità. E così di seguito.

Ci vien fornito così un esempio della cosidetta legge di Fechner, legge psicofisica di vasta portata, essenzialmente affine a quella di Weber. Essa dice che l'intensità delle nostre sensazioni non cresce proporzionalmente all'aumento di energia della causa determinante, bensì come il logaritmo del numero che tale energia rappresenta. In modo analogo alla minima variazione percettibile, quelle di maggior portata vanno calcolate in base a moltiplicazioni (e non addizioni) dei valori corrispondenti alla causa determinante.

LA SCALA DELL'INTENSITÀ SONORA

La variazione nell'intensità di un suono, determinata da un decuplo aumento dell'energia che quel suono provoca, vien chiamata « bel ». Non si tratta davvero dell'aggettivo che deriva dalla bellezza e dalla grazia: sono piuttosto i 3/4 del cognome di colui al quale si attribuisce l'invenzione del telefono: Graham Bell (1).

Il decuplo aumento dell'energia sonora ci è apparso, finora, determinato dal percorso di dieci suddivisioni, corrispondenti, ciascuna, a una variazione del 25%. Per essere più precisi, ogni suddivisione deve corrispondere a un aumento ottenuto moltiplicando per il fattore $\sqrt[10]{10}$, il cui valore è dato dal numero 1,2589.

Ogni suddivisione di 1/10 di « bel » vien chia-

(1) Il telefono fu inventato da Antonio Meucci, fiorentino. - N. d. T.

mato « decibel » e, come abbiam visto, corrisponde, circa, alla minima variazione nell'intensità di suono che l'udito percepisca, in condizioni normali.

L'intensità sonora, alla soglia dell'udito, vien considerata valore zero, cosicchè assumendo come unità la più piccola quantità di energia audibile avremo:

1	unità	di	energia	dà	un	suono	di	intensità:	0	decibel
1,26	»	»	»	danno	»	»	»	» :	1	»
1,58	»	»	»	»	»	»	»	» :	2	»
2	»	»	»	»	»	»	»	» :	3	»
4	»	»	»	»	»	»	»	» :	6	»
8	»	»	»	»	»	»	»	» :	9	»
10	»	»	»	»	»	»	»	» :	10	»
100	»	»	»	»	»	»	»	» :	20	»
1000	»	»	»	»	»	»	»	» :	30	»

LA SCALA DELLA SONORITÀ

Nella scala dell'intensità sonora lo zero corrisponde alla soglia dell'udito, ma, dato che questa, a sua volta, dipende moltissimo dall'altezza del suono in questione, si comprende come tale scala serva soltanto a confrontare la sonorità relativa di due suoni della stessa altezza. In caso contrario non può servire. È perciò che si rende necessaria l'introduzione di una nuova scala: quella della sonorità.

Il punto corrispondente allo zero, in questa scala, sta a indicare la sonorità (all'orecchio di un ascoltatore di normale udito) di un'onda, in seno all'aria, di frequenza 1000 e 1/5000 di baria di pressione (0,0002 di dina, per esser più precisi). Per un suono della suddetta frequenza, ciò corrisponde appunto alla soglia dell'udito.

L'unità di misura, in questa scala, si chiama « fon ». Se ci limitiamo ai suoni di frequenza 1000 il fon e il decibel corrispondono alla stessa grandez-

za, sia quantitativamente che per la posizione loro rispetto allo zero. Cosicchè se un suono di frequenza 1000 ha un'intensità di x decibel, rispetto alla scala dell'intensità dei suoni, avrà pure una sonorità di x fon rispetto a quella della sonorità. Quando però la frequenza si allontana dal valore 1000, il fon e il decibel divergono. Due suoni di differente altezza hanno la sonorità espressa dallo stesso numero di fon allorchè, rispetto all'orecchio, essi suonano con uguale forza. Diremo quindi che un suono è dotato di una sonorità di x fon quando, rispetto all'orecchio, è forte come uno di frequenza 1000 e di intensità x decibel. Tale suono viene a trovarsi x decibel sopra la soglia dell'udito, rispetto a uno di frequenza 1000, e non sopra a tale limite rispetto a uno che abbia la sua stessa frequenza.

LA SOGLIA DEL MALESSERE

Dopo aver determinato la quantità minima di suono che l'orecchio umano può avvertire, vediamo ora quale sia, reciprocamente, la quantità massima. Si tratta di un problema che ha la sua importanza. Supponiamo infatti di avere una sorgente di suono — per esempio, un gong — e di fornirgli, via via, quantità crescenti di energia: percuotendolo, quindi, sempre con maggior forza. Naturalmente il suono andrà facendosi più intenso, sinchè, a un dato istante, data la sua forza, non sarà più gradevole all'udito. In un primo tempo si limiterà a tanto, ben presto però arrecherà, a chi deve udirlo, un evidente senso di malessere. Finalmente, le vibrazioni che si producono nel timpano potranno divenire così violente da provocare un'acuta sofferenza e giunger persino a ledere l'orecchio.

Volendo determinare il numero di bel che l'udito tollera senza provar malessere, rileveremo ancora una volta che tale valore, come nel caso della soglia dell'udito, dipende dall'altezza del suono. Nelle ottave più basse del pianoforte è di circa sei bel: in prossimità del DO centrale raggiunge il valore 11; nell'ottava più alta sale sino a dodici, ed è probabile che oltre quella decresca rapidamente.

Tanto l'intensità del suono alla soglia dell'udito, quanto il campo sonoro, oltre la soglia, che l'udito tollera senza provarne malessere, mutano considerevolmente con l'altezza del suono. La loro somma, invece, la quale viene a determinare, per vari riguardi, la soglia del malessere e della sensazione dolorosa, varia molto meno. Per la maggior parte dei suoni che la musica impiega, l'intensità, a questa soglia, è data da una variazione di pressione corrispondente a circa 6000 barìe. Nella zona della nostra sensibilità massima scende invece a circa 200 barìe.

Possiamo rappresentare, schematicamente, il fenomeno tracciando il diagramma che vedesi in fig. 58.

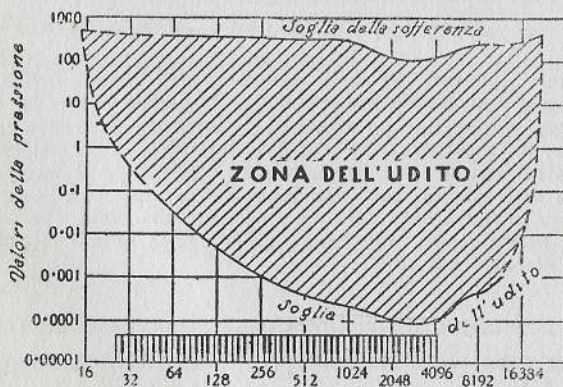



Fig. 58. - I limiti della zona dell'udito, determinati da Fletcher e Munson.

La zona tratteggiata, corrispondente alla regione dell'udito, può essere ulteriormente suddivisa da curve che congiungono i punti di uguale sonorità, come si vede in fig. 59. Tanto i limiti della regione dell'udito quanto le curve di ugual sonorità sono state determinate da Fletcher e Munson.

È facile rilevare che il nostro orecchio è particolarmente sensibile ai suoni deboli, mentre tollera male quelli forti. Ciò per le note che costituiscono la metà superiore del piano.

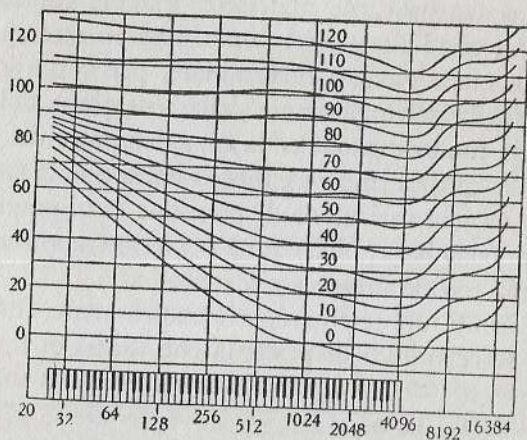



Fig. 59. - Intensità dei suoni compresi entro la zona dell'udito in base ai dati di Fletcher e Munson. A ciascun punto del diagramma, corrisponde un suono di determinata frequenza (asse delle x, tratto orizzontale) e di data intensità, in decibel (scala a sinistra, asse delle y). Il punto zero corrisponde al suono più debole di frequenza 1000 che possa essere udito. La sonorità, espressa in fon è data dal numero posto sulla curva che passa per il punto stesso. Le curve suddette sono quindi luoghi di punti di ugual sonorità.

Per risultare discretamente sonora, (50 o 60 fon), la parte melodica richiede poca energia, mentre quella del basso ne esige di più. Ciò vien confermato misurando accuratamente l'energia spesa suonando

vari strumenti. Nella seguente tabella son contenuti i dati risultanti da ricerche condotte recentemente nel Gabinetto Sperimentale della Società Telefonica Bell.

Origine del suono	Energia (in watt)
Orchestra di 75 esecutori, in un « fortissimo »	70
Timpano (basso), fortissimo	25
Canne d'organo, fortissimo	13
Trombone, fortissimo	6
Pianoforte, fortissimo	0,4
Tromba, fortissimo	0,3
Orchestra di 75 esecutori, mezzoforte	0,09
Quartino, fortissimo	0,08
Clarinetto, fortissimo	0,05
Voce umana: Basso, *ff.*	0,03
Voce umana: Contralto, *pp.*	0,001
Voce umana: Voce di persona che parla, normalmente	0,000024
Violino, sottovoce, in concerto	0,0000038

Vien fatto di notare, sia pure incidentalmente, la quantità minima di energia presente in un suono anche intenso. Per dar suono a una canna d'organo, piuttosto grande, può essere necessario un motore di 10.000 watt: di tale energia solo 13 watt ricompaiono sotto forma di suono; gli altri 9987 vanno perduti — per noi — in calore ed attrito. Un pianista, dotato di buoni muscoli, si stanca ben presto di suonare « fortissimo »; l'energia che egli spende è di circa 200 watt, eppure la parte che effettivamente si trasforma in suono è solo 4 decimi di watt! Mille bassi che cantassero « fortissimo » fornirebbero energia appena sufficiente per mantenere accesa una lampada da 30 watt; se, con pari vigore, facessero ruotare una dinamo, potrebbero provocare l'accensione di 6000 lampade del tipo suddetto.

La prima e l'ultima voce, nella tabella precedente, si riferiscono ai limiti estremi dei suoni che si possono udire in una sala da concerto. Notiamo che la prima voce corrisponde a un valore diciotto milioni di volte superiore a quello della seconda. Eppure tale intervallo, per quanto ampio appaia, comprende appena 7 bel e 1/4 e perciò è appena più ampio della metà dell'intervallo comprendente i 12 bel che l'orecchio tollera quando si tratti di suoni alti.

Per un ascoltatore che si trovi a discreta distanza dallo strumento si può ritenere che il pianissimo d'un violino sia 1 bel sopra alla soglia dell'udito, per la nota che sta suonando, cosicchè l'orchestra, al completo, è di circa 8,3 bel ossia 83 decibel. Paragoniamo tale dato con l'intensità degli altri suoni nella seguente tabella:

	Decibel
Soglia dell'udito	0
Fruscio di foglie	10
Lievi rumori in un giardino tranquillo a Londra	20
Parole sussurrate a m. 1,20 di distanza	20
Rumori in una via tranquilla di Londra	30
Centro di Nuova York, nel silenzio della notte	40
Conversazione, a m. 3,60 di distanza	60
Traffico stradale a Londra	60
Traffico stradale a Nuova York	68
Traffico stradale intenso a Nuova York	82
Leone ruggente a m. 5,40	88
Ferrovia sotterranea al passaggio di un treno espresso, Nuova York	95
Fabbrica di caldaie	98
Corazza d'acciaio martellata da 4 uomini, a m. 0,60 di distanza	112

Date le diverse soglie dell'udito, i suoni citati in questa e nella precedente non sono da porsi in ri-

goroso raffronto, a meno, beninteso, che non si tratti di suoni della stessa altezza. La tabella seguente contiene i dati relativi alle variazioni di sonorità soggettiva per alcuni suoni fra i più comuni.

	Fon
Soglia dell'udito	0
Tic-tac dell'orologio a m. 0,90 di distanza	20
Rumori in una via signorile, tranquilla	40
Conversazione tranquilla	60
Rumori in una via del centro, affollata	75
Rumori in un treno sotterraneo	90
Rumori in un negozio di macchine, affollato	100
In prossimità di un motore d'aviazione	120

In base ad esperimenti è risultato che un suono debole può anche non venir udito affatto, durante l'emissione di un suono più forte e della stessa altezza, se la differenza d'intensità supera il valore di bel 1,2 circa. Se poi i suoni sono di altezza molto diversa, la differenza suddetta va aumentando. A tre metri e sessanta di distanza si dovrebbe udire appena una conversazione nello sfondo sonoro di un intenso traffico a Londra, e ciò perchè la differenza di intensità è solo di un bel. Invece altrettanto non avverrà a Nuova York, dato che, in questa città, la differenza suddetta sale a bel 1,8. Allo stesso modo, il ruggito d'un leone verrebbe udito a malapena in una fabbrica di caldaie. Ponete lo stesso leone ruggente in mezzo alla folla d'una stazione di ferrovia sotterranea a Nuova York e vedrete che se ne accorgeranno, anche... auditivamente!

FREQUENZE GENERATE DALL'ORECCHIO

Dopo esserci così occupati della quantità, passiamo ora ad un altro lato della questione dei suoni: la loro qualità. Il suono, essendo formato da onde di data frequenza, è simile alla luce, e l'orecchio, come l'occhio, percepisce soltanto quelle onde la cui frequenza è compresa entro i limiti d'un determinato campo, piuttosto ristretto per la verità. Tuttavia l'orecchio è dotato di una proprietà che l'occhio invece non possiede. Alludiamo al fatto che l'orecchio crea, per conto proprio, alcune onde di frequenza assolutamente diversa da quella dei moti che lo sollecitano. Per tale motivo il cervello può udire suoni la cui frequenza non compariva affatto fra le note che la musica ha inizialmente emesso.

Non è difficile comprendere la causa del fenomeno.

Se la membrana del timpano fosse un semplice diaframma, come la pelle del tamburo o la lamina di un telefono, essa oscillerebbe in rispondenza a qualunque vibrazione le pervenisse. Beninteso se le vibrazioni non fossero così violente da modificarne permanentemente la forma. Comunque, nell'ipotesi che abbiamo considerato, le vibrazioni percepite dal cervello avrebbero, esattamente, la stessa frequenza di quelle che alla membrana del timpano trasmetterebbe l'aria. Ciò però avviene soltanto quando la forza che tende a ricondurre la membrana nella sua posizione normale (allorchè, per esempio, vien spostata di mm. 0,025 a destra) è, quantitativamente, equivalente, a quella che la sposta di un ugual tratto a sinistra. In altre parole, occorre pensare che la membrana del timpano e parti aderenti formino un complesso a simmetria bilaterale. Basta una conoscenza

anche superficiale del meccanismo dell'orecchio per sapere che questo non è il caso. La membrana del timpano non possiede siffatta simmetria. Da un lato di essa si trova una complessa catena di ossicini che trasmette le vibrazioni al cervello. Quando la membrana si sposta verso l'esterno, è solo in virtù dell'elasticità di cui è dotata se, giunta a un certo punto, si ferma e torna addietro; quando invece si sposta verso l'interno, questo suo moto viene ostacolato dalla catena degli ossicini.

Helmoltz fu il primo a segnalare questa particolare funzione degli ossicini. Dopo di lui, in un tempo assai recente, altri studiosi (Von Békésy, Chapin e Firestone) hanno asserito — basandosi sui loro esperimenti — che anche altri elementi che fan parte dell'orecchio, esercitano la stessa azione; per esempio la membrana basilare e il liquido che riempie la coclea

Per comprendere quali effetti possa arrecare tale fatto, supponiamo che l'aria trasmetta una vibrazione, corrispondente alla nota emessa da un diapason. Giunge, quindi, alla membrana del timpano, una serie di onde di pressione, e se il timpano fosse una struttura a simmetria bilaterale perfetta, si porrebbe a vibrare seguendo un moto periodico semplice, espresso dalla sinusoide che vediamo in fig. 60. Avviene invece che la presenza degli ossicini ostacoli il moto del timpano, per quanto riguarda una direzione, quella cioè rappresentata, nella figura suddetta, sotto all'asse orizzontale. In questo tratto, la reazione del timpano sarà limitata e lo spostamento si avvicinerà più alla traccia punteggiata in figura.

Per individuare le note effettivamente trasmesse all'orecchio converrà analizzare, nelle sue componenti, quella parte di curva che ha subìto una modifi-

cazione. La risultante consta del tratto più marcato, sopra all'asse orizzontale, e del tratto punteggiato, sotto all'asse stessa. Se la vibrazione sonora iniziale aveva la frequenza 200, il periodo, necessariamente, si ripeterà duecento volte al secondo, e il teorema di Fourier (q. v.) ci dice, in tal caso, che le componenti semplici del moto che la curva rappresenta avranno frequenza di valore: 200, 400, 600, 800, ecc. In altre parole: la mancanza di simmetria della membrana del timpano ha aggiunto nuove frequenze corrispondenti ai valori 400, 600, 800, ecc. a quella iniziale che era 200. In termini di musica diremo che

Fig. 60. - Come reagisce l'udito all'emissione di un suono singolo. L'orecchio umano, che è asimmetrico, fa sì che la curva del suono (la più marcata, in figura) in corrispondenza a determinate frequenze, si disponga secondo quei tratti che in figura appaiono punteggiati.

il timpano non solo trasmette la nota che gli è pervenuta, ma vi aggiunge l'ottava e tutte le altre armoniche naturali.

Supponiamo, ora, che sul timpano giungano, contemporaneamente, vibrazioni di frequenza 200 e 300. Se l'orecchio fosse una struttura simmetrica, reagirebbe alle due vibrazioni singole, con due moti periodici semplici, di frequenza 200 e 300, moti che avverrebbero simultaneamente. Le due componenti son rappresentate in fig. 61 dalle curve più sottili. La reazione, quindi, sarebbe rappresentata dalla composizione delle due curve (sinusoide a traccia più marcata). Ma, per la mancanza di simmetria nella struttura del timpano, una parte di questa curva vien sostituita, ancora una volta, dal tratto punteggia-

to. Volendo sapere quale nota il timpano trasmette al cervello, dovremo, ancora una volta, decomporre questa curva modificata, nelle due componenti. Dato che la curva stessa ricorre con frequenza 100, le componenti saranno di frequenza: 100, 200, 300, 400, 500, 600, ecc. Le frequenze 200 e 300 rappresentano le note fondamentali, mentre quelle di valore 400 e 600 corrispondono alle loro ottave; sapevamo infatti che esse compaiono. Ora le frequenze 100 e 500 corrispondono a tonalità del tutto nuove. La frequenza 100 può esser considerata come nota differenza perchè deriva da una differenza fra i valori dei vari punti che costituiscono due curve. Il valore 500 invece corrisponde a quella che può chia-

Fig. 61. - Come reagisce l'orecchio all'emissione contemporanea di due suoni. Anche in questo caso il diagramma rivela una deviazione della curva, secondo i tratti punteggiati.

marsi « nota-somma », in quanto corrisponde alla somma di due frequenze.

Se le due note iniziali avessero avuto le frequenze 200 e 201 rispettivamente il problema sarebbe stato trattato allo stesso modo. La curva corrispondente al corso degli spostamenti della membrana ricorrerebbe alla frequenza uno e, perciò, in base al teorema di Fourier, le due componenti sarebbero di frequenza 1, 2, 3, 4, ecc. Non bastano i principi generali finora enunciati per dirci a quali, di tutte queste frequenze, corrispondono suoni audibili e quali invece non abbiano importanza. Occorre un'investigazione matematica particolareggiata e tutt'altro che semplice.

Provvide per primo a tale analisi il fisico Helmoltz. Partendo dal presupposto che l'orecchio, come già abbiamo visto, è asimmetrico egli dimostrò anzitutto che una singola nota pura, giunta all'orecchio con le vibrazioni dell'aria ambiente, non produce nel timpano una nota della stessa frequenza. Oltre a ciò, l'asimmetria del nostro organo auditivo fa sì che a questa prima vibrazione se ne sovrapponga un'altra di frequenza doppia. In altre parole, l'orecchio spontaneamente, e per via della propria asimmetria, vivifica la nota aggiungendovi, sia pur meno intensamente, l'ottava.

Helmoltz dimostrò altresì che quando due note pure vengon suonate simultaneamente, l'orecchio, sempre spontaneamente, non solo vi sovrappone le loro ottave, ma vi aggiunge pure quelle che abbiamo chiamato « note-differenza » e « note-somma » con le frequenze che son loro proprie, come già abbiam visto.

E finalmente, qualora venga emessa contemporaneamente tutta una serie di note pure, p, q, r, ecc. l'orecchio non solo vi aggiunge le rispettive ottave (di frequenza 2p, 2q, 2r) ma anche le loro note-somma e note-differenza (di frequenza $p+q$, $q+r$, $p+r$, e $p-q$, $q-r$, $p-r$).

Helmoltz, però, suppose che l'asimmetria dell'orecchio arrecasse soltanto una lieve modificazione alle note, per modo che le ottave e le note-differenza fossero relativamente deboli. Ora ciò si è dimostrato vero quando le note fondamentali son deboli esse stesse; altrettanto non si può dire quando siano forti. Suonando simultaneamente alcune note di frequenza p, q e r e suonandole piuttosto fortemente si dimostra che l'orecchio ci fa udire una serie di note, le cui frequenze riportiamo qui sotto:

Più intensamente di tutte:

$\left.\begin{array}{l} p \\ q \\ r \end{array}\right\}$ le note fondamentali.

Seguono immediatamente, come intensità:

$\left.\begin{array}{l} 2p \\ 2q \\ 2r \end{array}\right\}$ le 2e armoniche delle soprascritte.

$\left.\begin{array}{l} p+q \\ q+r \\ p+r \end{array}\right\}$ le prime note-somma

$\left.\begin{array}{l} p-q \\ q-r \\ p-r \end{array}\right\}$ le prime note-differenza

Seguono inoltre, come intensità:

$\left.\begin{array}{l} 3p \\ 3q \\ 3r \end{array}\right\}$ le 3e armoniche

$\left.\begin{array}{l} p+q+r \\ 2p+q \\ 2q+p \\ 2q+r \\ 2r+q \\ 2r+p \\ 2p+r \end{array}\right\}$ le 2de note-somma

$\left.\begin{array}{l} 2p-q \\ P-q-r, \text{ etc.} \end{array}\right\}$ le 2de note-differenza.

Per porgere un esempio, supponiamo che le note fondamentali (di frequenza p, q, r) siano il DO (ott. centr.) il MI (ott. centr.) e il SOL (ott. centr.); cioè le quarte, le quinte e seste armoniche del DO (ott. grande). La serie completa delle note aggiunte è raccolta nel seguente specchietto:

Le note fondamentali	Le 4e, 5e e 6e armoniche del DO (ott. grande)
Le prime note - differenza	Il DO (ott. grande) due volte e le sue armoniche 2de
Le seconde armoniche	Le armoniche 8e, 10e e 12e del DO (ott. grande)
Le prime note - somma	Le armoniche 9e, 10e e 11e dello stesso
Le seconde note - differenza	Le armoniche 2e, 3e, 4e, 5e, 6e, 7e e 8e dello stesso
Le terze armoniche	Le armoniche 12e, 15e e 18e dello stesso
Le seconde note - somma	Le armoniche 13e, 14e, 15e, 16e e 17e dello stesso

Vediamo quindi che facendo suonare la 4ª, 5ª e 6ª armonica di una nota, senza peraltro che questa compaia, provvede l'orecchio ad aggiungere la fondamentale e tutte le armoniche sino alla diciottesima.

In linea di massima è vero che quando due o più note, suonate simultaneamente, sono armoniche di una stessa nota fondamentale l'orecchio vi aggiunge quest'ultima e molte armoniche, spontaneamente; cosa questa di enorme importanza in tutte le branche dell'acustica pura ed applicata. Qualora le note iniziali siano le armoniche dispari di una certa fondamentale l'orecchio, spontaneamente, vi aggiunge tutte quelle pari. Allorchè la differenza di frequenza che intercede fra due note è lieve, quella che abbiamo chiamato la loro nota-differenza ha la stessa frequenza dei battimenti che abbiamo già trattato, cosicchè quando le due note iniziali si avvicinano l'una all'altra, la loro « nota-differenza » degenera in battimenti, mentre la « nota-somma » tende a divenire la loro seconda armonica.

NOTE-SOMMA E NOTE-DIFFERENZA

Le note-differenza, dette anche « suoni di combinazione » vennero scoperte dall'organista tedesco Sorge nel 1754 e poi, indipendentemente, dal celebre Tartini, il grande violinista. Per udirle basta, di solito, suonare due note qualsivoglia, purchè intercedа, fra esse, un intervallo di quinta. Così facendo si udrà la nota un'ottava sotto alla più bassa delle prime due (il « terzo suono » di Tartini).

Suonando, per esempio, il DO (ott. centr.) e il SOL (ott. centr.) al pianoforte e con una certa forza, si udrà il DO dell'ottava piccola. Si possono udire

altresì quando due voci cantano assieme, soprattutto se si tratta di due soprani; il « terzo suono » provoca, in tal caso, una sorta di accompagnamento, in un tono piuttosto basso. Se, per esempio, due soprani cantano le due note DO e MI (1ª ott.), udremo il DO (ott. picc.) come accompagnamento. Se le due note suddette sono bene intonate, il DO risultante sarà in accordo perfetto con loro. Se poi il DO e il SOL vengono cantati in ugual temperamento la nota più bassa che si udrà, tenderà piuttosto al DO diesis (picc. ott.) provocando, ciò che Helmoltz definisce: « un orribile accompagnamento, tanto più importuno e tedioso in quanto stona di ben poco con quello regolare ». Il grande fisico era d'avviso che queste combinazioni dissonanti di note costituivano: « l'elemento più tedioso delle armonie in ugual temperamento ».

Le note-somma furono scoperte da Helmoltz nel 1856. Si odono più raramente delle note-differenza soprattutto per il fatto che esse si trovano in una zona di frequenza che è già occupata dalle armoniche dei suoni originali.

Non è mai sorto dubbio alcuno sul fatto che tali suoni siano effettivamente audibili, mentre si è discusso a lungo per sapere se si tratti o no di un fenomeno soggettivo. È logico che se essi venissero uditi solo come conseguenza dell'asimmetria dell'orecchio, esisterebbero unicamente dentro all'orecchio e non si troverebbe, al mondo, risuonatore alcuno capace di porli in evidenza. Per vario tempo si ritenne dunque che tali suoni fossero soggettivi, nel senso su accennato: poi Helmoltz riuscì a dimostrarne l'oggettiva esistenza e, per quanto i suoi esperimenti al riguardo siano stati a lungo discussi e contrastati, oggi nessuno pone più in dubbio che, in determinate

circostanze, essi esistano di fatto e possano quindi impressionare un risonatore. Ne abbiamo una riprova suonando al piano le note DO e SOL (ott. centr.) piuttosto fortemente. Non soltanto udremo il DO (ott. picc.) ma ci accorgeremo inoltre che le corde del piano che a quest'ultima nota corrispondono vibrano (se pur debolmente) e quindi possono far ca-

Fig. 62. - La nota-differenza, di solito, forma accordo coi suoni che l'han generata. La nota-somma invece no.

dere alcuni trucioletti di legno che avremo, a tale scopo, posto a cavaliere su di esse.

L'esistenza effettiva di questi suoni è facilmente spiegabile. Ogni suono infatti è rappresentato da una curva e questa, come sappiamo, subisce una certa distorsione ogni qual volta il suono si trasmette da un mezzo all'altro. Ora se uno di questi è asimmetrico produrrà, sulla curva del suono, lo stesso effetto dell'asimmetria dell'orecchio e sarà causa di

note-somme e di note-differenze in quel modo che abbiamo già spiegato.

Vanno considerate, queste note, alla stregua di altrettante impurità che si mescolano ai suoni puri ogni qual volta la curva sonora vien ritrasmessa da una qualsiasi struttura asimmetrica. È facile, al riguardo, riconoscere che la maggior parte degli oggetti che ritrasmettono il suono sono asimmetrici, chi più chi meno.

Tanto in teoria quanto in pratica si dimostra concordemente che se le note iniziali sono deboli, tanto le « somma » che le « differenza » sono ancor più deboli: le « somma » poi, pressochè impercettibili. Si tratta di una circostanza veramente propizia all'ascoltatore, in quanto può avvenire spesso che due o più note, in perfetto accordo fra loro, diano origine invece a note-somma in disaccordo. Tale circostanza è illustrata nella fig. 62. D'altra parte, come mostra l'ultimo rigo, le note-differenza, sempre più intense delle « somma », sono di solito concordi.

Abbiamo definito impurità le « note-somma » e le « note differenza » e la nostra asserzione è giustificata: d'altronde non va dimenticato che anche le impurità possono essere, volta a volta, dannose o propizie. Tutto considerato, le note-somma vanno ascritte alle impurità dannose mentre le « differenza » arrecano sovente numerosi vantaggi.

LE NOTE-DIFFERENZA IN PRATICA

Il telefono ci fornisce un esempio tangibile di tale fatto. Il diaframma di un telefono — come d'altronde qualunque altra struttura — vibra con determinate frequenze; ora si dà il caso che queste siano comprese fra i limiti, superiore ed inferiore, entro i

quali variano quelle corrispondenti alla voce umana. Può quindi avvenire che il diaframma accentui eccessivamente, per risonanza, le note emesse dalla voce umana, dotate di frequenza uguale a quella di certe sue vibrazioni libere, mentre invece non riproduca audibilmente le altre. A volte certi telefoni mediocri agiscono a questo modo e trasformano la voce in una successione di schiocchi, di timbro metallico. Invece un buon telefono moderno è costruito in guisa tale che le vibrazioni proprie del diaframma si estendono, con la massima uniformità consentita, in un campo di frequenze che varia da 300 a 2400. Perciò i suoni compresi entro l'intervallo suddetto saranno trasmessi con buona intensità, mentre quelli di frequenza oltre i limiti previsti non verranno riprodotti. Ora, siccome le note principali della voce maschile e femminile son poste inferiormente a tale intervallo, avviene che il telefono trasmetta soltanto una minima parte delle note principali di una conversazione. Il diaframma riproduce sopratutto le armoniche di quelle note e l'orecchio dell'ascoltatore, provvede, spontaneamente, a ricomporre le note originali sotto forma di « note-differenza ». Ora queste ultime son quelle che, in definitiva, vengono udite con più che sufficiente intensità. La Società Telefonica Bell, Americana, ha inciso due serie di dischi che illustrano il fenomeno in modo chiarissimo. Sui dischi della prima serie si odono: la voce di un cantante, quella di una persona che parla, il suono di un organo e via dicendo; ciascuna espressione è nitida e fedele. Nei dischi della seconda serie, invece, si odono le stesse voci e gli stessi strumenti di prima, solo che le note fondamentali sono state deliberatamente tolte. E pure la seconda serie, acusticamente, risulta altrettanto in-

telligibile e chiara quanto la prima per quanto manchino le note fondamentali. Queste, infatti, vengono generate, dall'orecchio stesso dell'ascoltatore, sotto forma di « note-differenza ».

Altrettanto, a un dipresso, avviene negli alto-parlanti delle nostre radio. Molti apparecchi sono stati costruiti in modo da escludere le note di frequenza inferiore al valore 250 (DO, ott. centr. = 256) e perciò non si odono affatto le tonalità basse e tenorili. Eppure si ode benissimo il basso degli strumenti a corda, degli ottoni e delle voci maschili. Il fatto si spiega pensando che tutti questi suoni abbondano di armoniche. È appunto con queste che l'orecchio ricompone le note fondamentali e le armoniche inferiori, sotto forma di note-differenza. Queste, in unione delle armoniche alte trasmesse tali e quali, ricomporranno quelle note che l'orchestra aveva effettivamente suonato. Ora ciò può avvenire solamente quando le armoniche vengano copiosamente fornite. Quindi un diapason di nota bassa non verrebbe udito, dato che nel suono che gli è proprio mancano le armoniche. Anche il tamburo darà un suono di altezza diversa dalla propria, giacchè le frequenze delle sue vibrazioni libere non formano una serie di armoniche naturali (vale a dire note, le cui frequenze stiano fra loro nei rapporti 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, ecc.). Lo stesso dicasi dei piatti, di vari tipi di campane ed in generale degli strumenti a percussione. E finalmente (giacchè siamo in argomento) degli applausi al termine di un brano, in un concerto. Infatti l'applauso è un rumore, senza armoniche, e quindi privo di quelle che, per altri suoni, son le componenti più efficaci.

Le note-differenza vengono utilizzate altresì da quei fischietti che usano gli arbitri nelle partite di

calcio e i vigili. Soffiando nell'imboccatura, un flusso d'aria si suddivide ugualmente in due tubetti metallici, di lunghezza lievemente ineguale. Questi, naturalmente, emetteranno due note di frequenza un po' diversa cosicchè chi ascolta udrà entrambe le note e la loro nota-differenza. Riducendo progressivamente la diversa lunghezza delle due cannucce, potremo render bassa a piacere la nota risultante. Per esempio: due tubicini lunghi rispettivamente cm. 5 e 6,3 genereranno una nota risultante la cui frequenza è pari a quella emessa da un tubicino lungo 90 centimetri. I tubicini possono anche esser talmente corti da far sì che le loro note singole siano al disotto del livello di audibilità. Così facendo, non viene udito il suono di ciascun tubicino, sollecitato da solo, mentre si ode chiaramente la risultante.

Riducendo ulteriormente la differenza di lunghezza fra i due tubicini, si può ottenere un suono illimitatamente basso, solo che, a un certo punto, il diapason della risultante sarà inferiore al limite di sensibilità dell'orecchio umano e questi non percepirà più alcun suono. Avvicinando ancor più le due note singole, la risultante ricompare, questa volta però sotto forma di battimenti.

Il fabbricante d'organi si vale di questo principio per ottenere note molto gravi senza peraltro incorrere nella spesa di una canna particolarmente lunga. Per esempio: in un organo grande, la canna più lunga, quella del DO (ott. dopo l'ultima dei bassi, nel pianoforte) misura circa m. 9,60 e la sua nota propria ha la frequenza 16 mentre le varie armoniche hanno, rispettivamente, le frequenze 32, 48, 64 e così via. La nota suddetta è pressochè inaudibile; si tratta, più che altro, di una vibrazione che si diffonde lungo le pareti e l'impiantito e che si

avverte nell'aria, più che udirla. L'orecchio invece percepisce le armoniche di quella, di frequenza 32, 48 ecc. corrispondenti alle note DO (controttava) SOL (ott. grande) ecc. Perciò quella immensa canna, relativamente costosa, non avrebbe altro scopo che quello di produrre vibrazioni di frequenza 16 e 10 2/3 sotto forma di armoniche che l'orecchio poi ricompone in note-differenza. Ora a queste possono benissimo provvedere alcune canne di minori dimensioni e quindi meno costose. Ecco perchè, in molti organi, le canne più voluminose vengono sostituite da coppie di canne più piccole che emettono la 2ª e la 3ª armonica della nota richiesta. Tale combinazione è nota col nome di « basso acustico »; se ben costruita può dare l'illusione, quasi perfetta, di udire il [nota musicale]. Ciò non toglie che si udrà anche la sua 3ª armonica e con sproporzionata intensità.

Un fatto analogo avviene pure con i suoni più gravi del pianoforte. Le note fondamentali di questi sono talmente basse che l'orecchio le percepisce soltanto quando vengano suonate molto energicamente, nel qual caso si udranno anche le armoniche superiori troppo intensamente. In circostanze normali è quasi certo che l'orecchio ode direttamente solo le armoniche e la nota fondamentale, invece, come nota-differenza.

Dall'altra banda della scala musicale lo stesso principio viene utilizzato nel registro della « mistura » dell'organo. Si tratta di un nome generico applicato a un complesso di tasti (mistura, cornetta, ripieno, sesquialtera, armoniche ecc.) nel quale ciascun tasto corrisponde a varie canne piccole, di diapason alto. Spesso, se pur non sempre, le note emes-

se dalle singole canne sono appunto le armoniche delle fondamentali. Suonando, per esempio, l'ultimo DO in basso dell'organo, registro « mistura » può provocare l'emissione di una delle seguenti note:

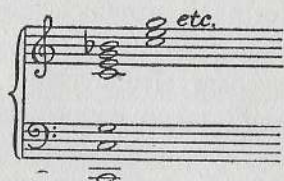



Fig. 63.

Il moderno registro « mistura » viene usato solo per render più vivace il tono generale. Nei confronti del pianoforte, del violino e degli strumenti a fiato, il suono dell'organo è deficiente di quelle armoniche alte che lo rendono più brillante, cosicchè questo requisito gli può solo venir aggiunto introducendo, artificialmente, le armoniche suddette, prodotte da canne separate. Nei vecchi organi il registro « mistura » spesso serviva a tutt'altro scopo: le armoniche emesse dalle canne degli acuti si combinavano fra loro per dare la nota fondamentale, a simiglianza di quanto abbiam visto nel caso del « basso acustico ». Alcuni vecchi organi che si trovan tuttora in certe Chiese Tedesche, Olandesi e Italiane, a badare alle loro indicazioni parrebbe constassero di vari ordini di « misture ». Invece, udendoli, emettono note piene di colorito musicale, da una serie di canne assai piccole. Il costruttore di organi, in passato, riusciva mirabilmente a riempir le navate delle Chiese con note di superbo effetto, pur valendosi di uno strumento meno voluminoso di un pia-

no verticale e pel quale occorreva altresì ben poco vento. Si comprende che l'artefice conseguiva tale effetto valendosi di canne le cui note avevano quelle frequenze alle quali l'orecchio umano è maggiormente sensibile. Questo sistema, tuttavia, non si può dir privo di inconvenienti. Infatti ciascuna canna del registro mistura emetteva le proprie armoniche in aggiunta alla fondamentale e perciò tutti quei vari ordini di misture provocavano suoni striduli e discordi. Quindi, ogni volta che ciò fosse possibile, l'artefice provvedeva ad aggiungere canne, sia pur voluminose, ma atte ad emettere note pure. Per esempio: il famoso organo di Schnitger nella Chiesa di Sant'Jacopo ad Amburgo ha undici ordini di misture, su pedali, ma possiede altresì due registri per canne di m. 9,60 ciascuna, i manuali contengono 39 ordini di misture e commutazioni, ma anche quattro registri per canne lunghe m. 4,80.

IL MECCANISMO DELL'ORECCHIO

Giunti così al termine di questo libro e dovendolo concludere, ci parrebbe di farlo in modo perfetto e dilettevole se fossimo ora in grado di spiegare al lettore il « perchè » delle straordinarie facoltà, possedute dall'orecchio e che, volta per volta, abbiam posto in rilievo. Purtroppo la scienza non è ancora in grado di farlo: si può dire anzi che non esista, ai nostri giorni, una teoria esauriente sul processo auditivo e sul meccanismo dell'orecchio.

Siamo giunti, esplorandone i recessi, solo in prossimità della membrana del timpano e della catena di ossicini che si trova immediatamente dietro a quella. Gli ossicini trasmettono la vibrazione del timpano alla seconda membrana, la finestra del vesti-

bolo; essi servono anche da dispositivo di sicurezza, in modo analogo ai pattini del freno di un'automobile; devon cioè proteggere la finestra del vestibolo da eventuali guasti, qualora la membrana del timpano venga sollecitata in modo violento ed improvviso. Traversando tale membrana, ci troviamo all'interno della coclea, che abbiam visto esser d'osso. Vista dall'esterno, la coclea ha l'aspetto del tegumento d'una chiocciola, o di un condotto a spirale. È lunga, in tutto, circa 32 mm.: il diametro va restringendosi gradualmente e uniformemente, procedendo nel senso della lunghezza, cosicchè, in media, si può valutare in mm. 1,56. Il tubo, all'interno, è cavo e ci appare diviso, longitudinalmente, in due parti uguali, per modo che ciascuna è lunga circa mm. 32, ha un diametro di mm. 1,56 e un'altezza media di 77/100 di millimetro. Le due divisioni vengon chiamate rispettivamente: « canale semicircolare superiore », e « canale semicircolare posteriore ». Sono entrambe colme di un liquido speciale detto endolinfa, e comunicano esclusivamente mediante una piccola apertura chiamata « helicotrema », all'estremo più ristretto. La « finestra del vestibolo », costituisce appunto una specie di finestrino che si apre all'estremo più lato del canale superiore, mentre la così detta « finestra della chiocciola », ne va a formare un altro, nel canale posteriore. Tale disposizione, in forma schematica ci appare nella figura seguente.

Allorchè la membrana del timpano vien sollecitata e si pone in vibrazione, il moto che ne risulta vien trasmesso, per mezzo degli ossicini, alla finestra del vestibolo, e da questa al liquido che riempie la coclea. Si determinano così alternanze di pressione che, diffondendosi nel liquido del canale se-

micircolare superiore, attraversano la helicotrema, il canale posteriore, e consumano quindi l'energia che le ha determinate, ponendo in vibrazione la finestra della coclea.

Il vario complesso di elementi che abbiamo sinora descritto, ha il solo compito di trasmettere questi impulsi ritmici di pressione lungo i due canali della coclea, e impedire, al tempo stesso, che essi vengano rimandati. Ora, se la divisione o, per così dire, il pavimento che separa i canali fosse un comune pavimento, la nostra esposizione sarebbe finita. Invece così non è, giacchè tale divisione per

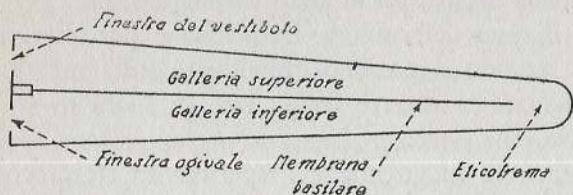



Fig. 64. - Rappresentazione schematica della coclea.

metà larghezza è ossea: si potrebbe paragonare a una specie di balcone sporgente dalla parete della coclea. L'altra metà (ed è la più importante) è formata da una membrana sottile ed uniforme, la membrana basilare, la cui struttura è rafforzata da un numero ingente di fibre fittissime. Volendo paragonare la coclea a un oggetto che tutti conoscono potremmo pensare a un piano a coda di struttura complicatissima ma in miniatura. Si pensi infatti che questa membrana che pure ha uno spessore di mm. 0,00312, e una larghezza di mm. 32 circa, consta di ben 24.000 fibre, ognuna delle quali è lunga da mm. 1,6 a mm. 0,14! Le fibre più corte, corrispondenti alle corde degli acuti nel piano, sono

molto fitte; quelle all'altro estremo — corrispondenti alle corde dei tasti bassi, sono invece più sparse.

A dire il vero, la coclea è talmente piccolina che la simiglianza che abbiamo addotta con un pianoforte, può anche apparire eccessivamente fantastica e quindi arbitraria. Tuttavia si dimostra che le varie « corde » della struttura fisiologica corrispondono a note di varia altezza. Sono stati infatti condotti esperimenti tendenti a dimostrare che, danneggiando determinati punti della membrana basilare di certi animali, per esempio, perforando la parete della coclea, gli animali divengono sordi per le note di una determinata frequenza e per altre no. Così facendo si possono individuare sulla membrana basilare le diverse frequenze dei suoni di varia altezza.

Può aver luogo anche l'esperimento reciproco e cioè: facendo in modo che un animale non oda più i suoni di una determinata altezza, troveremo danneggiata una certa zona della sua membrana basilare.

Da ciò risulta chiaramente che ogni fibra è consociata con una data frequenza o suono ad essa corrispondente e quindi vien fatto di pensare che queste vibrazioni siano appunto quelle libere, di queste fibre. Può apparire incredibile che una fibra più corta di mm. 1,6 possa essere di natura siffatta da emettere la stessa nota di una corda da pianoforte lunga un metro e 80 cm. (chè a tanto porterebbe l'ipotesi formulata) eppure il calcolo tenderebbe ad ammetterlo. Già abbiamo visto che per abbassare il diapason di una corda tesa basta aumentarne la massa, e infatti le corde più gravi del pianoforte sono rivestite da un avvolgimento a spire di filo di ra-

me. Ora le fibre della membrana basilare sono incorporate nella membrana e, dato che quest'ultima partecipa alla vibrazione, si comprende come, in definitiva, essa aumenti anche la loro massa. A ciò si aggiunga che la vibrazione della membrana, pone in movimento l'endolinfa e quindi anche questo fatto contribuisce ad accrescere la massa effettiva delle fibre, specialmente nel tratto dove i canali sono più ampi.

Beatty ha calcolato che conferendo alle fibre dei suoni bassi una tensione di circa Kg. 1,300, per pollice quadrato di sezione verticale, esse vibrerebbero con la dovuta frequenza. Per le fibre degli acuti, invece egli ha trovato che, perchè ciò avvenga, esse dovrebbero venir tese in corrispondenza a un peso di oltre 4000 chili per pollice quadrato. Orbene: i capelli umani, prima di cedere, possono sottostare a una pressione di ben 9100 chilogrammi per pollice quadrato. Le minuge e il budello di baco di seta (l'estremo del filo delle lenze) resistono la tensione causata da pesi di 27 e 32 tonnellate per pollice quadro, rispettivamente. Passando poi al pianoforte, aggiungeremo che per spezzarne una corda d'acciaio occorre una tensione corrispondente al peso di oltre 160 tonnellate per pollice quadro.

Abbiamo quindi buone ragioni per pensare che la membrana basilare e le fibre giacenti in essa, godano molte proprietà della tavola armonica e delle corde di un pianoforte a coda. Abbiamo già visto che le corde del piano possono fungere da risonatori: le onde sonore, attraversando l'aria, fanno vibrare la tavola armonica e provocano per risonanza, le vibrazioni di quelle corde che hanno la frequenza uguale alla loro. Lo stesso forse avviene di quelle onde sonore che, attraversando il liquido della co-

clea, provocano le vibrazioni della membrana basilare e quelle delle fibre che hanno la loro frequenza. È facile ora immaginare che ogni fibra, singolarmente, sia collegata al cervello per mezzo di un nervo proprio e che questi conduca al cervello impulsi minimi di corrente elettrica, informandolo così sulle vibrazioni delle varie fibre, e quindi sulla composizione di qualunque suono solleciti la membrana del timpano.

Abbiamo così esposto, se pure a grandi linee, la « teoria dell'udito, in base alla risonanza ». È facile comprendere, riferendosi ad essa, come possa l'orecchio scindere un accordo nelle sue componenti di differente altezza. L'occhio invece, che non dispone di tale facoltà, non è in grado di scomporre un insieme di colori nei singoli elementi che lo compongono. Basterebbe questo a dimostrare la differenza che corre fra il meccanismo dell'orecchio e quello dell'occhio. La teoria della risonanza spiega anche la legge di Ohn, e cioè che l'orecchio non giunge a distinguere le differenze di fase nelle vibrazioni che concorrono a formare una nota composta. In altre parole l'orecchio non giunge a informare il cervello sulla forma, matematica, della curva corrispondente al suono che sta udendo ma solo sul modo col quale l'energia è distribuita nelle varie note pure. Non può ambire a un riconoscimento scientifico una teoria acustica che non giunga a spiegare due fatti così importanti: la teoria della risonanza, invece, sottoposta alla prova, la supera ottimamente. Molte altre teorie sull'udito sono state proposte in questi ultimi tempi. Alcune paragonano il funzionamento di un orecchio a quello di un telefono, altre a quello di un diaframma, di

un'arteria pulsante, e via dicendo, ma nessuna si è poi dimostrata all'altezza del compito.

Ciò non toglie però che quando si voglia sviluppare la teoria della risonanza, cercando di illustrarla con maggiori particolari di quanto non abbiam fatto in queste pagine, sorgono subito numerose difficoltà.

I canali che si trovano superiormente e posteriormente alla membrana basilare non sono vuoti, e non lo potrebbero essere giacchè contengono gli elementi necessari a trasformare le vibrazioni delle fibre in impulsi elettrici ed oltre a questi, contengono quei nervi che conducono tali impulsi al cervello. Si pensi che all'interno della coclea si trovano disposti 24.000 minutissimi congegni elettrici e che dall'asse centrale di essa parte un fascio di 24.000 nervi conduttori. Un simile macchinario è necessariamente complicatissimo: tanto è vero che la scienza non è ancor giunta a porne in luce il funzionamento.

L'UDITO NEGLI ANIMALI

Se nell'uomo l'udito è veramente sorprendente per la complessità degli elementi che lo determinano e per la sottile potenza che da quelli scaturisce, negli animali inferiori tale facoltà dovrà apparirci ancor più mirabile. I mammiferi, di solito hanno gli orecchi simili a quelli dell'uomo, ma più semplici. Il gatto, per esempio, ha la coclea composta di tre volute (mentre l'uomo ne ha due e tre quarti) ma nella sua membrana basilare si trovano soltanto 16.000 fibre invece delle 24.000 dell'uomo. Anche i rettili e gli uccelli possiedono orecchi simili ai no-

stri ma più semplici; gli uccelli hanno la membrana basilare fornita di 3000 fibre circa.

Per molto tempo si è creduto che gli insetti fossero dotati di organi dell'udito totalmente diversi da quelli dei vertebrati. Invece recenti indagini hanno dimostrato chiaramente che gli orecchi degli insetti sono, per molti riguardi, simili a quelli. Varia invece moltissimo l'ubicazione loro, cosa questa che ci appare strana quando si pensi che taluni insetti, ad esempio, hanno gli organi dell'udito nell'addome, altri nel torace, altri infine nelle zampe anteriori, sotto alla giuntura del ginocchio.

Nel grillo campestre, i timpani appaiono sotto forma di minuscole membrane circolari, una su ogni lato della regione inferiore del corpo. Dietro ad essi si trovano altri orecchi interni e questi hanno vari punti di somiglianza con quelli dell'uomo. Altre varietà di grilli hanno gli organi dell'udito nelle zampe anteriori. Il professor Regen di Vienna ha dedicato uno studio particolare agli organi auditivi ed all'udito del grillo Thamnotrizon Apterus. Durante il periodo degli amori, il maschio per amoreggiare con la femmina, partecipa a una specie di gara di canto, o meglio di cinguettìo: vince la femmina che cinguetta meglio. Non si potrebbe davvero sostenere che lo stimolo sessuale si eserciti per mezzo dell'udito, nè attraverso l'olfatto o la vista, tanto è vero che la femmina può essere eccitata... per telefono. Nel corso di un esperimento, il professor Regen è riuscito a far frinire un Apterus maschio di fronte al microfono. All'altro estremo del filo, la femmina, udendo, si accostò d'un balzo al ricevitore, saltò sul bordo di questo e rimase in ascolto. Durante un altro esperimento, il maschio venne posto nella navicella di un palloncino, pieno di idro-

geno, che lo sollevò in aria: le femmine, per udirlo, lo seguirono a volo. In circostanze normali la femmina è solita slanciarsi, a volo, direttamente, verso quel maschio che più le è piaciuto. Se però le membranelle che si trovano sotto alla giuntura dei ginocchi, nelle zampe anteriori, son bucate o, comunque, danneggiate, l'insetto non ode più e non si slancia a volo. Qualora una sola membrana sia sciupata, la femmina cerca tuttavia il maschio ma ha perduto il senso dell'orientamento; vola di fianco e giunge in prossimità del compagno dopo una serie di voli sbandati.

E, come ultimo esempio, citeremo il caso di alcune varietà di farfalle e di tignole che hanno un paio di orecchi nel torace. La gamma dei suoni che questi insetti odono è limitata ai suoni alti. Le note comuni degli strumenti musicali non vengon da essi percepite, mentre un suono stridente ed acutissimo, quale, ad esempio, il cigolìo del sughero su un vetro o quello di un tappo smerigliato entro il collo della bottiglia, fanno loro mutare la direzione del volo. Ma se le membranelle toraciche sono state danneggiate, non ha più luogo tale reazione e ciò dimostra che questi insetti hanno veramente gli organi dell'udito nel torace.

Gli studiosi dell'evoluzione, nel regno animale, ci informano che l'orecchio è stato l'ultimo degli organi sensori a comparire. Esso è, fra tutti, il più complicato ma anche ed indubbiamente il più ammirevole.

FINE

Abbiamo tratto dal libro del Beatty « L'udito nell'uomo e negli animali » (Bell 1932) molte delle notizie surriferite. Il libro contiene numerosi altri esempi. - N. d. T.

INDICE

33

J. JEANS

Scienza e musica

BOMPIANI

Lire Quattordici